

# 1. Resumen

En el presente proyecto se recogen una serie de propiedades y características sobre los combustibles tradicionales derivados del petróleo, gasolina y gasoil, y sobre los combustibles alternativos que tienen posibilidades de sustituirlos o complementarlos en el futuro. Los datos recogidos se centran básicamente en particularidades interesantes para la aplicación de estos combustibles en motores alternativos de combustión interna de aplicación en automóviles.

En primer lugar se describe cada uno de los combustibles seleccionados por separado y a continuación se concluye con un análisis comparativo de sus propiedades entre los mismos. Los resultados obtenidos se resumen en unas tablas que describen la posible aplicabilidad de los combustibles alternativos en el sector transporte.

El trabajo pretende facilitar la toma de decisión técnica en cuanto a las posibles utilizaciones de los nuevos combustibles o sus combinaciones, en aplicaciones concretas.





## 2. Sumario

<b>1. RESUMEN</b>	<b>1</b>
<b>2. SUMARIO</b>	<b>3</b>
<b>3. INTRODUCCIÓN</b>	<b>7</b>
3.1. Objetivos del proyecto.....	7
3.2. Alcance del proyecto.....	7
<b>4. PROPIEDADES QUE CARACTERIZAN EL USO DE COMBUSTIBLES EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA</b>	<b>9</b>
4.1. Definiciones, propiedades y características propias de los combustibles y de la mezcla con aire. ....	11
4.2. Definiciones asociadas a la aplicabilidad de un combustible en un MACI....	15
4.3. Propiedades del aire .....	19
<b>5. COMBUSTIBLES TRADICIONALES APLICADOS EN MOTORES MACI</b>	<b>23</b>
5.1. Petróleo .....	23
5.1.1. Definición petróleo.....	23
5.1.2. Derivados del petróleo.....	24
5.2. Gasolina .....	25
5.2.1. Definición .....	25
5.2.2. Composición .....	25
5.2.3. Propiedades.....	26
5.2.4. Características medioambientales.....	27
5.3. Gasoil .....	28
5.3.1. Definición .....	28
5.3.2. Composición .....	28
5.3.3. Propiedades.....	29
5.3.4. Características medioambientales.....	30
<b>6. COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS APLICADOS EN MOTORES MACI</b>	<b>31</b>
6.1. Biogás.....	33
6.1.1. Definición .....	33
6.1.2. Composición .....	33



6.1.3.	Origen y generación .....	34
6.1.4.	Propiedades .....	37
6.1.5.	Características de aplicabilidad en MACI.....	38
6.1.6.	Características medioambientales.....	38
6.2.	Biocarburantes .....	38
6.2.1.	Biodiesel .....	40
6.2.2.	Alcoholes .....	44
6.3.	Gases Licuados del Petróleo (GLP) .....	51
6.3.1.	Definición .....	51
6.3.2.	Composición.....	51
6.3.3.	Obtención .....	52
6.3.4.	Propiedades .....	53
6.3.5.	Características de aplicabilidad en MACI.....	53
6.3.6.	Características medioambientales.....	54
6.4.	Gas Natural .....	55
6.4.1.	Definición .....	55
6.4.2.	Composición.....	55
6.4.3.	Obtención .....	56
6.4.4.	Propiedades .....	58
6.4.5.	Transporte y almacenamiento .....	59
6.4.6.	Características de aplicabilidad en MACI.....	60
6.4.7.	Características medioambientales.....	60
6.5.	Hidrógeno.....	61
6.5.1.	Definición .....	61
6.5.2.	Composición.....	61
6.5.3.	Obtención y generación de hidrógeno.....	62
6.5.4.	Propiedades .....	63
6.5.5.	Características de aplicabilidad en MACI.....	64
6.5.6.	Características medioambientales.....	66
<b>7.</b>	<b>ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE LOS COMBUSTIBLES .....</b>	<b>67</b>
7.1.	Tabla de propiedades y características .....	67
7.2.	Características y prestaciones energéticas.....	72
7.3.	Emisiones contaminantes .....	83
7.3.1.	CO <sub>2</sub> .....	84
7.3.2.	CO, HC, NO <sub>x</sub> y partículas.....	92
<b>8.</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>97</b>
	<b>PERSPECTIVAS DE FUTURO .....</b>	<b>101</b>



**AGRADECIMIENTOS** 103

**BIBLIOGRAFÍA** 105

**ANEXOS** 107

A Presupuesto .....	107
A.1 Gastos de investigación y desarrollo.....	107
A.2 Gastos de administración .....	108
A.3 Gastos totales del proyecto .....	108
B Cálculos.....	109
B.1 Cálculo Del Dosado Estequiométrico.....	109
B.2 Cálculo Del Contenido Energético De La Mezcla.....	114
B.3 Cálculo Del Consumo Específico De Cada Combustible.....	117
B.4 Cálculo De Las Emisiones De CO <sub>2</sub> .....	120
B.5 Cálculo De La Densidad De La Mezcla .....	123
C Unidades de conversión .....	125





## **3. Introducción**

### **3.1. Objetivos del proyecto**

Los objetivos del proyecto se pueden dividir en dos partes. En primer lugar el motivo de realización del mismo es profundizar en el conocimiento de los principales combustibles alternativos para su uso y aplicación en motores de combustión interna de uso en automoción. Y, en segundo lugar, como objetivo clave del estudio, interconectar estos conocimientos y datos individuales, en una comparación conjunta, que permita seleccionar la tecnología más adecuada para cada situación.

El siguiente estudio pretende recopilar y analizar información acerca de los combustibles alternativos disponibles en la actualidad: biogás, biocarburantes, gases licuados del petróleo, gas natural e hidrógeno, y de esta manera poder convertirse en documento de consulta dirigido a estudiantes, profesionales del sector y personas interesadas en el tema.

### **3.2. Alcance del proyecto**

El alcance del proyecto se centra únicamente en los combustibles alternativos para el uso en motores alternativos de combustión interna para limitar la extensión del trabajo y realizar un estudio más específico.

No ha sido objeto del presente estudio:

- La utilización de estos combustibles en aplicaciones estacionarias, ni en plantas de obtención de energía mecánica basadas en células de combustible.
- El análisis económico debido a la fluctuación del precio en el mercado libre de estos combustibles.







## 4. Propiedades que caracterizan el uso de combustibles en motores de combustión interna

El desarrollo del presente estudio se centra en el análisis de los procesos de obtención de energía mecánica utilizando diferentes tipos de combustibles convencionales y alternativos para alimentar a Motores Alternativos de Combustión Interna (MACI). Este proceso sigue, a grandes rasgos, el esquema que se indica la Figura 4.1.

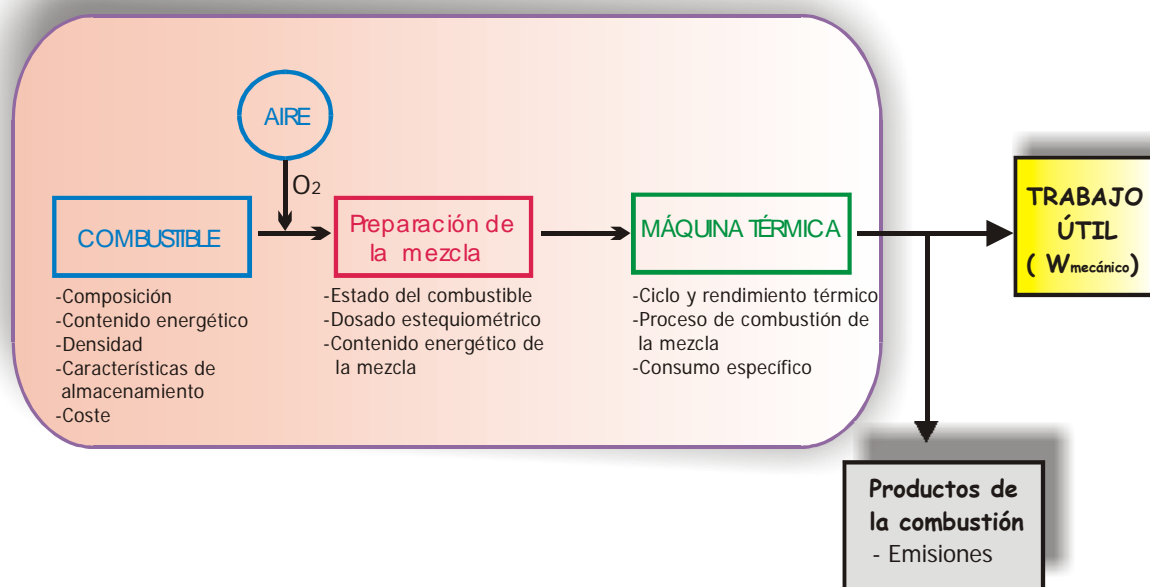


Fig. 4.1. Esquema del proceso de funcionamiento de un MACI

La obtención de energía mecánica ( $W_{útil}$ ) en motores alternativos de combustión interna se logra como resultado del proceso de combustión del combustible con aire. Obviamente la combustión no es continua, como en un motor de flujo continuo o como una turbina de gas, sino que el proceso es intermitente. Por ello, los combustibles deben cumplir una serie de requisitos (que se explicarán con más detalle en los siguientes apartados) para satisfacer adecuadamente estas y otras exigencias:



- ❑ En motores de encendido provocado (que se explican posteriormente), el combustible debe evaporarse fácilmente y formar una mezcla homogénea con el aire previamente a su introducción en el cilindro (combustión de premezcla).
- ❑ En motores de encendido por compresión (explicados posteriormente) el combustible debe permitir una buena pulverización para facilitar la rápida combustión por difusión.
- ❑ El combustible, independientemente de la temperatura ambiente, debe facilitar un arranque rápido y seguro del motor; evaporación en MEP y viscosidad adecuada en MEC.
- ❑ Para asegurar una combustión completa con las menores emisiones posibles los combustibles deben poseer unas características adecuadas que son el objeto de este trabajo.
- ❑ El combustible debe contribuir a evitar el desgaste y la corrosión de las partes internas del motor.

Por lo tanto, los Motores Alternativos de Combustión Interna, reflejados en el esquema como máquina térmica, permiten el uso de casi todo tipo de combustibles, líquidos, sólidos o gaseosos siempre y cuando cumplan las características mencionadas con anterioridad, es decir, los combustibles líquidos y gaseosos. En la Figura 4.2. se representan esquemáticamente los requisitos y operaciones de preparación necesarias e inherentes al estado físico de los combustibles para obtener una combustión correcta, es decir, rápida y completa, así como el calor aportado ( $Q_e$ ) al ciclo termodinámico que se suministra mediante el proceso de combustión, el cual se realiza en la cámara de combustión del motor.

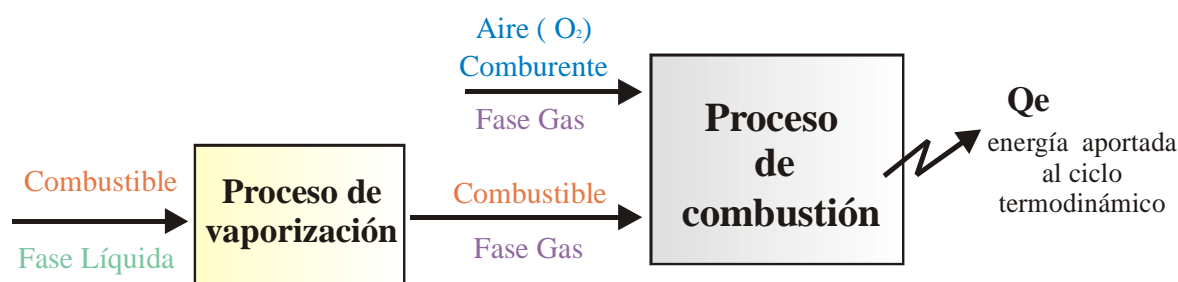


Fig. 4.2. Esquema del proceso de combustión y estado de los combustibles



## 4.1. Definiciones, propiedades y características propias de los combustibles y de la mezcla con aire.

El análisis de un combustible, en lo que a su aplicabilidad en MACI se refiere, requiere del conocimiento de sus propiedades físico-químicas. Las características físicas de un carburante son aquellas que afectan a su capacidad para formar una mezcla gaseosa de combustible y aire apropiada para el tipo de motor en el que se vaya a utilizar; también influyen en su almacenamiento, su transporte y sus criterios de venta. Las características químicas, en cambio, afectan a su capacidad y comportamiento durante la combustión y también a la seguridad durante el almacenamiento. A continuación se detallan las definiciones y la importancia de las propiedades analizadas de cada uno de los combustibles a estudiar.

- **Combustible:** sustancia química con carácter reductor, capaz de reaccionar con el oxígeno (o con otro oxidante) de forma rápida y exotérmica.
- **Estado:** sólido, líquido o gaseoso. A pesar estas posibilidades el estudio analiza combustibles líquidos y gaseosos debido a su facilidad de dosificación y control de alimentación en motores de combustión interna. El estado del combustible influye en su almacenamiento y dispensación, por lo tanto, directamente en su coste. Los combustibles en fase gas se mezclan con el aire más fácilmente y además no se necesita vaporizarlos previamente a la mezcla.
- **Composición química:** caracterización química de una sustancia, indica la proporción de los componentes que conforman la sustancia. Su conocimiento permite realizar diversos cálculos relacionados con la combustión, principalmente del dosado estequiométrico para la mezcla de aire y combustible y los productos de la reacción de combustión.
- **Masa molecular:** es la suma de los pesos atómicos de los átomos que forman una molécula. Su conocimiento permite calcular el dosado estequiométrico en la mezcla aire y combustible en la reacción de combustión.
- **Poder calorífico del combustible:** capacidad de un combustible para ceder calor mediante una reacción ideal de oxidación. Los hidrocarburos al quemar (reacción gracias al oxígeno) dan lugar a vapor de agua y dióxido de carbono. El vapor de agua puede condensarse o no, este hecho da lugar a la distinción entre poder calorífico inferior y superior. También se puede definir al poder calorífico como la diferencia de entalpías estándar de formación de los productos menos la de los reactivos (a  $T=25^{\circ}\text{C}$ ).



Indica la cantidad de energía que teóricamente se puede obtener de una cantidad determinada de combustible, su análisis permite la comparación del contenido energético entre unos combustibles y otros.

- **Poder calorífico inferior del combustible (PCI):** es la cantidad de calor producido por la combustión teórica y completa de una unidad de masa o volumen del combustible sin que condense el vapor de agua que contienen los productos de la combustión. Debido a las altas temperaturas de los gases de escape se utiliza el PCI en la aplicación de los combustibles en MACI.
- **Poder calorífico superior del combustible (PCS):** es la cantidad de calor producido por la combustión teórica y completa de una unidad de masa o volumen de combustible suponiendo que condense el vapor de agua que contienen los productos de la combustión, al condensar el vapor de agua se desprende una cantidad de energía que diferencia el valor entre el PCI y el PCS.
- **Densidad o peso específico:** relación existente entre una masa de combustible y el volumen que ocupa en unas condiciones de referencia\* de presión y temperatura dadas.
- **Densidad relativa:** es la relación existente entre el peso específico del combustible y entre el peso específico de un elemento de referencia. Para sólidos y líquidos el elemento de referencia es el agua ( $1000 \text{ kg/m}^3$ ), y para gases es el aire ( $1,293 \text{ kg/m}^3$ ).
- **Número de Octano (N.O.):** número normalizado para caracterizar la resistencia de un combustible para llegar a producir detonación o autoencendido en un motor de referencia. Para medir el número de octano se realiza un estudio que consiste en: introducir el combustible X en un motor de referencia en funcionamiento, al mismo tiempo se va aumentando la relación de compresión hasta que se detecta detonación. Con la misma relación de compresión a la que ha detonado el combustible X, se prueban mezclas de isooctano y n-heptano hasta que vuelve a detonar. A partir de este proceso se define el N.O. como % de isooctano de la mezcla de isooctano y n-heptano. La importancia del número de octanos hace referencia a la resistencia a la detonación del combustible. Si el N.O. es inadecuado (demasiado pequeño) la combustión se produce de manera violenta causando una explosión o detonación que por su intensidad puede causar daños al motor del vehículo. Su estudio permite la comparación de la calidad de la combustión en motores de tipo Otto.
- **Número de Cetano (N.C.):** es la medida de la capacidad de autoignición del combustible, redundando en la calidad de ignición y posterior combustión. Para determinar el NC se compara el combustible con los patrones de referencia de Cetano



( $C_{16}H_{34}$ ) y el alifametilnaftaleno ( $C_{10}H_7CH_3$ ) cuyos índices son 100 y 0 respectivamente. Permite la comparación de la calidad de la combustión en motores de ciclo Diesel. Si el NC es excesivamente bajo el funcionamiento del motor es áspero, característico de un tiempo de retraso grande y presenta dificultad en el arranque en frío.

- **Número de metano (N.M.):** número normalizado para caracterizar la capacidad del gas natural para no llegar a producir detonación en los motores. Se mide como la detonación que produce el combustible comparada con los patrones de referencia conocidos. El número de metano es conceptualmente igual que el número de octano, es decir,  $N.O. = f(N.M.)$ , solo que es superior a 100 para el gas natural, por ello ambos conceptos están relacionados, pudiéndose utilizar la siguiente expresión:

$$N.O. = 0,67 * N.M. + 73,2$$

- **Viscosidad:** la viscosidad es una medida de la fluidez de un elemento, y depende de la temperatura a la que se mida. Una sustancia fluye lentamente cuando está fría (más viscosa) y más rápidamente cuando está caliente (menos viscosa). Influye en el diseño de los inyectores y en el proceso de pulverización, por tanto en la calidad de la combustión en motores de encendido por compresión.
- **Punto de inflamación (nivel de ignición):** temperatura a partir de la cual una mezcla de combustible y aire es capaz de iniciar la reacción. Influye en la temperatura a la que se inicia la combustión, temperaturas demasiado elevadas pueden perjudicar el funcionamiento de los componentes del motor, temperaturas elevadas de combustión provocan la producción de óxidos de nitrógeno como resultado de la reacción del combustible con el aire, además esta temperatura influye en la seguridad de la operación y manipulación del combustible.
- **Volatilidad:** las propiedades más significativas relacionadas con la volatilidad son:
  - **Punto de ebullición:** es la temperatura a la cual se produce la transición de la fase líquida a la gaseosa. En el caso de sustancias puras a una presión fija, el proceso de ebullición o de vaporización ocurre a una sola temperatura; conforme se añade calor la temperatura permanece constante hasta que todo el líquido ha hervido. El punto normal de ebullición se define como el punto de ebullición a una presión total aplicada de 101,325 kPa (1 atm); es decir, la temperatura a la cual la presión de vapor del líquido es igual a una atmósfera.
  - **Volatilidad:** propiedad que se mide igual que la presión de vapor. Registra de manera indirecta el contenido de los componentes volátiles que brindan la seguridad del producto durante su transporte y almacenamiento. Los combustibles para uso en motores de encendido provocado han de tener una



volatilidad equilibrada, es decir, han de estar formados por una mezcla proporcionada de componentes que destilen a temperatura alta y baja.

- **Presión de vapor:** es la presión ejercida por el vapor de un líquido cuando se encuentra en equilibrio de fase.
- **Curva de destilación:** indica la temperatura a la cual se evapora un determinado porcentaje de combustible, tomando una muestra de referencia. Relaciona al combustible con su volatilidad y composición. Los carburantes compuestos por diferentes hidrocarburos no tienen una temperatura de cambio de fase única durante el proceso, por esta razón se utiliza la curva de destilación.

*Aplicación:* es una propiedad importante en combustibles que funcionan en motores de encendido provocado, debido a que el carburante ha de estar evaporado para formar la mezcla y durante el proceso de compresión en el cilindro. Si la volatilidad es excesivamente baja se dificulta el arranque en frío y si la volatilidad es excesivamente alta hay una tendencia a la obstrucción de la alimentación del combustible por formación de “tapón de vapor” en la línea de alimentación.

- **Dosado estequiométrico:** es la relación entre la cantidad de aire y la de combustible necesario para que se produzca la combustión completa y sin que falte ni sobre comburente. Indica la cantidad de unidades de aire necesarias para reaccionar de modo ideal con una unidad de combustible. Influye directamente en la calidad de la combustión, permite calcular el PCI de la mezcla de combustible y aire. También afecta a las emisiones de la reacción, si no se utiliza la cantidad suficiente de aire la combustión es incompleta o por el contrario si la cantidad de aire es excesiva puede no ocurrir la combustión.
- **Límites de inflamabilidad:** la cantidad de aire precisa para que se produzca la combustión es más o menos variable y tiene unos límites llamados de inflamabilidad: el inferior y el superior, entre los cuales es posible la ignición del combustible con el aire. Estos valores indican el % de combustible necesario en la mezcla. Indica el intervalo existente para que una mezcla de aire y combustible pueda producir su ignición entre dichos valores. Afecta a la seguridad de la operación del combustible.
- **Poder calorífico inferior de la mezcla:** es la cantidad de calor producido por la combustión completa de una unidad de masa o volumen de la mezcla de combustible y aire sin que condense el vapor de agua que contienen los productos de la combustión. El poder calorífico de la mezcla permite comparar el contenido energético absoluto de las mezclas a la hora de aplicarlas en un motor de combustión interna.



## 4.2. Definiciones asociadas a la aplicabilidad de un combustible en un MACI.

La aplicabilidad de un combustible en un motor alternativo de combustión interna no depende únicamente de sus propiedades intrínsecas, las características del proceso de combustión de la mezcla en el interior de la máquina térmica en la que se utilice van a determinar los resultados definitivos.

- **Tipo de ciclo térmico utilizado:** ciclo Otto y ciclo Diesel.
  - **Ciclo Otto:** Termodinámicamente se tienen dos tipos de ciclo, el ciclo Otto Teórico y el Ciclo Otto Real, el primero es el ciclo ideal que se asocia a motores de encendido provocado por una chispa, el cual difiere del ciclo Otto real.

En el ciclo se puede distinguir las siguientes fases: compresión adiabática del fluido del motor, aportación instantánea de energía a volumen constante, expansión adiabática y la cesión instantánea de energía a volumen constante. El ciclo real se diferencia del teórico en el hecho que las líneas rectas del diagrama de éste son sustituidas por líneas curvas y los ángulos se redondean, es decir, la temperatura y la presión máximas y el rendimiento térmico global es más bajo que en el ciclo teórico. Tal y como se puede observar en la Figura 4.3.:



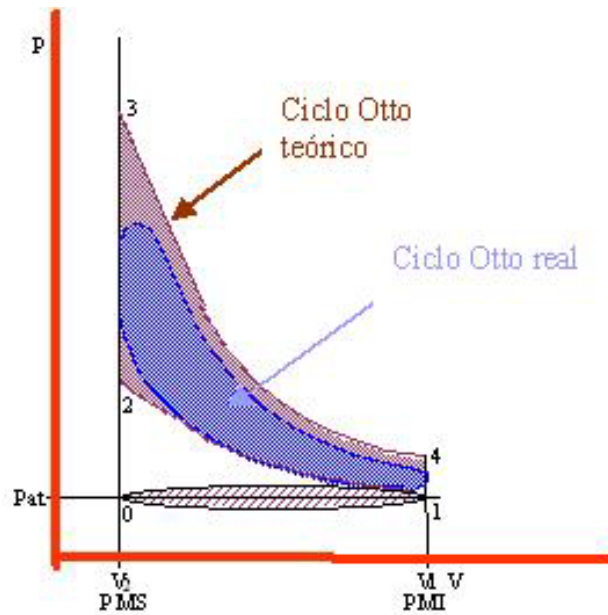


Fig. 4.3. Ciclo termodinámico Otto teórico y real

El ciclo Otto se caracteriza por que la combustión se realiza a volumen constante, mediante la explosión de la mezcla de combustible y aire, que se han sido previamente introducidos en el cilindro mezclados, provocada por una chispa. Es decir, el combustible es dosificado, homogenizado y vaporizado previamente a partir de carburador o el inyector, y el encendido es provocado haciendo saltar una chispa entre dos electrodos de una bujía en el interior de la cámara de combustión.

Este ciclo termodinámico es el utilizado en motores de encendido provocado (MEP). Los cuales se caracterizan por tener una relación de compresión bastante baja, 8:1 a 12:1, y por lo tanto un rendimiento termodinámico menor que en el ciclo Diesel en el que la relación de compresión es mayor.

- **Ciclo Diesel:** El ciclo teórico para motores de combustión interna está compuesto por cuatro fases: la compresión adiabática del fluido del motor, la absorción de energía a volumen constante, la expansión adiabática y la cesión de energía presión constante. Al igual que en el ciclo Otto, el ciclo teórico difiere del ciclo real, siendo sus diferencias las que se visualizan en la Figura 4.4.





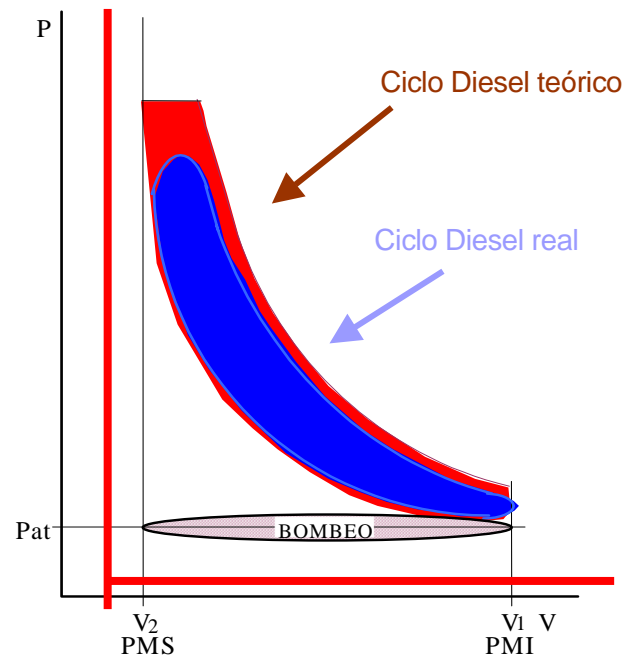


Fig. 4.4. Ciclo termodinámico Diesel teórico y real

El ciclo Diesel, que se utiliza en motores de encendido por compresión (MEC), se caracteriza por conseguir la energía a través de una combustión lenta.

El proceso de combustión consiste en la inyección del combustible en la cámara de combustión, donde está el aire que ha estado comprimido por el pistón. La compresión aumenta la temperatura del aire hasta unos 900°C, por la cual cosa el combustible, que entra vaporizado mediante la inyección, se inflama espontáneamente. La relación de compresión es de 14:1 hasta 25:1.

▪ **Características de funcionamiento en MEP:**

- **Dosificación y formación de la mezcla:** la mezcla se produce en el conducto de admisión donde el aire está frío por lo que el combustible debe poseer una volatilidad adecuada para formar una mezcla que sea inflamable.
- **Encendido:** un foco de alta energía produce la ignición de la mezcla aire y combustible dosificada que deberá resistirse a la autoignición térmica (picado) y a la inflamación por focos de elevada temperatura de menor densidad energética (encendido superficial).



- **Combustión:** una vez producido el encendido la combustión de la mezcla homogénea se produce por la propagación de un frente de llama. Para completar la combustión de todo el combustible contenido en la mezcla ha de existir como mínimo la cantidad de aire estequiométrica.

▪ **Características de funcionamiento en MEC:**

- **Dosificación y formación de la mezcla:** en primer lugar se introduce una cantidad de aire que comprimido adiabáticamente sufre un importante incremento de temperatura y a continuación se inyecta progresivamente el combustible debidamente pulverizado para formar la mezcla a nivel local, siendo ayudado el proceso por la turbulencia.
- **Encendido:** el contacto entre el combustible inyectado y el aire en la cámara de combustión a una presión y temperatura adecuadas provoca la ignición. Para un funcionamiento suave será deseable una inflamación lo más rápida posible del combustible conforme éste va penetrando, así se evita la acumulación de combustible cuya ignición retrasada provoca un aumento excesivamente brusco de la presión (picado).
- **Combustión:** la combustión se produce de manera heterogénea a medida que el combustible inyectado reacciona con el aire presente. Cada gota atomizada de combustible debe vaporizarse mezclarse con el aire, por esta razón se ha de trabajar con exceso de aire para asegurar la combustión completa.

- **Consumo específico:** parámetro indicativo de la masa de carburante gastada según la energía generada [ gcarburante / kWh ]. Del mismo modo indica el rendimiento del motor si se tiene en cuenta su poder calorífico. Como más pequeño sea el consumo específico, mejor es la eficiencia del ciclo termodinámico real y del motor en general. Por lo tanto el consumo específico se puede entender de diversas formas:

$$1) \quad \text{Cons.específico} = \frac{\dot{M}_{\text{carb.gastada}}}{\text{Pot.generada}} = \frac{g/h}{kW} \quad (\text{Ec. 4.1})$$

$$2) \quad \text{Cons.específico} = \frac{M_{\text{carb.gastada}}}{\text{Energ.generada}} = \frac{g}{kWh} \quad (\text{Ec. 4.2})$$



$$3) \quad 1/\eta = \frac{\text{Energ.introducida}}{\text{Energ.generada}} = \frac{M_{\text{carb.gastada}} * PCI}{\text{Energ.generada}} = \text{Cons.específico} * PCI$$

$$\longrightarrow \text{Cons.específico} = \frac{1/\eta}{PCI} \quad (\text{Ec. 4.3})$$

## NOTAS

### \* Condiciones de referencia:

#### 1.- Condiciones normales:

Presión absoluta	1,01325 bar (0 bar efectivos)
Temperatura absoluta	273,15 K (0°C)

#### 2.- Condiciones estándar:

Presión absoluta	1,01325 bar (0 bar efectivos)
Temperatura absoluta	288,15 K (15°C)

#### 3.- Condiciones ambientales:

Presión absoluta	1,01325 bar (0 bar efectivos)
Temperatura absoluta	298,15 K (25°C)

## 4.3. Propiedades del aire

El aire es un componente esencial del proceso de funcionamiento de los motores alternativos de combustión interna debido a la proporción de oxígeno contenida en él que actuará como comburente en la reacción de combustión del hidrocarburo. Gracias a este



comburente (oxígeno) los combustibles son capaces de reaccionar y transmitir su contenido energético al motor si se realiza un ciclo termodinámico. Por esta razón a continuación se describen las características más significativas del aire.

La composición del aire es variable dependiendo de las condiciones en las que se encuentra y su localización. A pesar de esta variabilidad, en la siguiente Tabla 4.1.se muestra la composición aproximada del aire puro.

COMPONENTE		CONCENTRACIÓN (% vol.)
Nitrógeno	N <sub>2</sub>	78,03
Oxígeno	O <sub>2</sub>	20,99
Dióxido de Carbono	CO <sub>2</sub>	0,03
Argón	Ar	0,94
Neón	Ne	0,00123
Helio	He	0,0004
Criptón	Kr	0,00005
Xenón	Xe	0,000006
Hidrógeno	H <sub>2</sub>	0,01
Metano	CH <sub>4</sub>	0,0002
Óxido nitroso	N <sub>2</sub> O	0,00005
Vapor de agua	H <sub>2</sub> O	Variable
Ozono	O <sub>3</sub>	Variable
Partículas	-	Variable

TABLA 4.1. Composición aproximada del aire

El aire es un fluido incoloro, inodoro, insípido y mal conductor del calor y la electricidad especialmente cuando está seco. Desprovisto de vapor de agua su comportamiento se aproxima al de los gases ideales y sus propiedades dependen de la presión y la temperatura.



Químicamente, sus propiedades específicas son las de los gases que lo constituyen. Desde el punto de vista de los motores los gases que influyen en la combustión son el oxígeno y el nitrógeno, los demás componentes se pueden ser considerados inertes.

Algunas de las propiedades físico-químicas, considerando el comportamiento del aire como un gas ideal, se especifican a continuación, en la Tabla 4.2. :

PROPIEDAD		
Peso molecular medio	g/mol	28,96
Densidad en cond. normales	Kg/m <sup>3</sup>	1,2929
Densidad en cond. estándar		1,2256
Densidad en cond. ambientales		1,1847
Calor específico a P cte Cp	kcal/kg °C	0,241
Calor específico a V cte Cv	kcal/kg °C	0,172

TABLA 4.2. Propiedades características del aire





## **5. Combustibles tradicionales aplicados en motores MACI**

Desde los comienzos del desarrollo del motor de combustión interna, y a medida que el automóvil se volvió más popular, se empezaron a utilizar como combustible los derivados del petróleo, principalmente la gasolina y posteriormente el gasoil. Estos combustibles han impulsado el movimiento a millones de automóviles por todo el mundo, de forma que ocupan uno de los puestos más importantes en el campo de derivados del petróleo.

Ante esta situación, es necesario hacer una breve explicación sobre el petróleo, a partir del cual derivan muchos combustibles fósiles, no renovables, y entre ellos, algunos destinados a la utilización en el transporte, los cuales se explicarán durante el desarrollo del proyecto.

### **5.1. Petróleo**

#### **5.1.1. Definición petróleo**

El petróleo es un compuesto químico compuesto por hidrocarburos, y por pequeñas proporciones de nitrógeno, azufre, oxígeno y algunos metales. Se presenta de forma natural en depósitos de roca sedimentaria y en lugares donde hubo mar.

El nombre de petróleo etimológicamente significa aceite de piedra, ya que tiene la textura de un aceite y se encuentra en yacimientos de roca sedimentaria.

La formación del petróleo depende de diversos factores entre ellos la ausencia de aire, restos de plantas y animales, altas temperaturas, acciones bacterianas..., este hecho hace que su presencia sea muy variable: líquido, dentro de rocas porosas y entre los huecos de las piedras; volátil, es decir, un líquido que se vuelve gas al contacto con el aire; y semisólido, con textura de ceras. En definitiva el petróleo, de por sí, es un líquido y se encuentra mezclado con gases y con agua.

El petróleo es un fluido algo espeso cuyo color varía bastante, así como su composición. A veces se presenta amarillo, otras verde, y otras casi negro. Generalmente tiene un olor muy desagradable y su densidad está comprendida entre 800 y 950 kg/m<sup>3</sup>. Su composición es muy variante, contiene un 84-88% de carbón y entre el 11,5 y el 14% del resto de componentes e hidrógeno.



### 5.1.2. Derivados del petróleo

Se considera petróleo crudo al petróleo en su estado natural, cuando aún contiene gas y no ha sufrido ningún tipo de tratamiento, tal y como se ha descrito en su definición. Este tipo de petróleo no es directamente utilizable, salvo raras veces como combustible.

El petróleo se somete a diversos procesos o tratamiento para obtener sus diversos subproductos, donde resultan productos acabados y las materias químicas más diversas. Este conjunto de procesos recibe el nombre refino o refinación. Este proceso se inicia con la destilación a presión a atmosférica en la que se separan los componentes de la mezcla. Esta operación se realiza en un cilindro de más de 50m de altura en el cual se introduce el petróleo, que previamente ha sido calentado hasta 400°C. El petróleo crudo va entrando continuamente y van saliendo los diferentes productos destilados según sus puntos de ebullición. A continuación los compuestos obtenidos son refinados nuevamente en otras unidades de proceso donde se modifica su composición molecular o se eliminan los compuestos no deseados, como puede ser el azufre.

Por lo tanto, mediante la destilación del petróleo se obtienen progresivamente todos aquellos compuestos de temperatura de ebullición parecidos y que tienen características también parecidas.

- Gases: metano, etano, propano y butano. Al propano y al butano también se denomina gases licuados del petróleo o GLP.
- Éter de petróleo: contiene principalmente pentanos y hexanos, consiste en una fracción volátil.
- Gasolinas y naftas: mezclas formadas por hidrocarburos de cuatro a doce átomos de carbono.
- Queroseno: se usa como combustibles en algunos motores, como el de los aviones. Es una fracción del petróleo formada por una cadena de doce a dieciséis carbonos.
- Gasoil: compuesto formado por cadenas de quince a dieciocho carbonos. Se utiliza para motores diesel y de calefacción.
- Fueloils residuales: productos pesados obtenidos de los residuos de la destilación atmosférica. Se usan en grandes instalaciones como son las centrales térmicas.
- Aceites lubricantes: fracción que contiene entre 16 y 30 carbonos, cuyas propiedades lo hacen muy útil como lubricante en el mundo de la mecánica.





- Residuos sólidos: ceras minerales, productos farmacéuticos, alquitranes, betunes y plásticos para centenares de aplicaciones útiles.

En la siguiente Tabla 5.1 se muestran aproximadamente las diferentes temperaturas de ebullición a las que destilan los diferentes derivados del petróleo.

Cantidad (% Volumen)	Punto de ebullición (°C)	Átomos de carbono	Productos
1-2	<30	1-4	gas natural, metano, butano, gas licuado
15-30	30-200	4-12	Eter de petróleo, nafta, ligroína, gasolina cruda
5-20	150-300	12-15	queroseno
10-40	300-400	15-25	gas-oil, fuel-oil, aceites lubricantes, ceras, asfaltos
8-69	>400	>25	aceite residual, parafinas, breas

TABLA 5.1 Temperaturas de ebullición de los diferentes derivados del petróleo

En el estudio que se realiza únicamente se examinarán aquellos derivados que sean de aplicabilidad en el sector transporte.

## 5.2. Gasolina

### 5.2.1. Definición

La gasolina es una mezcla manufacturada que no ocurre naturalmente en el medio ambiente. La gasolina tal y como se ha visto en el punto anterior es producida de petróleo en el proceso de refinación. Es un líquido incoloro, pardo pálido o rosado, y es sumamente inflamable.

### 5.2.2. Composición

Se trata de una mezcla de cadenas de hidrocarburos de cinco a nueve átomos de carbono, de relativa volatilidad, con o sin pequeñas cantidades de aditivos, los cuales están mezclados para formar un combustible conveniente para uso en motores automotrices de combustión interna.



La gasolina, concretamente, está compuesta por una mezcla de hidrocarburos isoparafínicos, parafínicos, olefínicos, nafténicos y aromáticos. Su fórmula química esta compuesta por una cadena de siete carbonos, aunque puede variar en función de su procedencia.

La composición química media que se utiliza en este estudio es  $C_{7,18}H_{13,1}O_{0,1}$ , considerada como la más habitual, siendo sus componentes básicos el hidrógeno y el carbono.

Como se ha comentado, la gasolina es una mezcla de un centenar de estas especies de compuestos y varían desde el butano hasta el metil naftaleno, es decir, las características de una gasolina están fuertemente relacionadas por el tipo de hidrocarburo que contiene.

### 5.2.3. Propiedades

Las principales propiedades de la gasolina se centran en las cuatro que se describen a continuación:

- **Número de octano:** es la principal propiedad ya que está altamente relacionada con el rendimiento del motor del vehículo. Es la medida de su calidad antidetonante, es decir habilidad para quemarse sin causar detonación. La gasolina tiene un número de octano entre 90 y 100 dependiendo del tipo de gasolina.
- **Curva de destilación:** esta propiedad se relaciona con la composición de la gasolina, su volatilidad y su presión de vapor. Por lo tanto se considera que a un 10% de destilación, con una temperatura de ebullición inferior a 70°C, se asegura la presencia de componentes volátiles para un fácil arranque en frío. A un 50% de destilación, con una temperatura de ebullición inferior a 140°C, se asegura una volatilidad correcta y una máxima potencia durante la aceleración del motor. A un 90% y al punto final de destilación, con una temperatura de ebullición inferior a 190°C y 225°C respectivamente, se evitan tanto depósitos en el motor como dilución del aceite y se proporciona un buen rendimiento del combustible.
- **Volatilidad:** la gasolina es muy volátil. Esta propiedad representa de forma indirecta el contenido de los componentes volátiles que brindan la seguridad, en este caso de la gasolina, en su transporte y almacenamiento. Esta propiedad de la gasolina se mide como la presión de vapor la cual tiene un valor de 0.7-0.85 mmHg.
- **Contenido de azufre:** Se relaciona con la cantidad de azufre presente en el producto. Si esta cantidad sobrepasa la norma establecida, la gasolina puede tener efectos corrosivos sobre las partes metálicas del motor y de los tubos de escape. También se relaciona con



efectos nocivos sobre el ambiente, siendo un factor importante en la producción de lluvia ácida.

Además de ser un líquido fácilmente inflamable, incoloro, de una densidad relativa de 0.7 a 0.77 menor a la del agua, posee un gran poder antidetonante, medido por el índice de octano.

La gasolina se caracteriza por proporcionar al motor del vehículo un arranque fácil en frío, una potencia máxima durante la aceleración, la no dilución del aceite y un funcionamiento normal y silencioso bajo las condiciones de funcionamiento del motor. Esto es debido a sus buenas propiedades de octanaje y volatilidad.

Actualmente existen diversos tipos de gasolinas, en función del número de octanos, por lo tanto debe de usarse aquella que sea apropiada al motor del vehículo, en función de su relación de compresión, ya que cuanto mayor sea la relación de compresión del motor, mayor tiene que ser el octanaje de la gasolina. En el caso de utilizarse una gasolina de menor número de octanaje que el adecuado, se produce un fenómeno denominado detonación o pre-encendido (expansión muy brusca y descontrolada).

#### **5.2.4. Características medioambientales**

En los motores de combustión interna de encendido provocado se quema gasolina (hidrocarburos) para así obtener la energía necesaria. Como consecuencia de esto, a través del tubo de escape de los vehículos, se expulsan a la atmósfera sustancias que contribuyen a su contaminación. Estas son, entre otras:

- ◆ Hidrocarburos sin quemar
- ◆ Óxidos de nitrógeno
- ◆ Monóxido de carbono
- ◆ Aditivos del combustible

Para reducir estas emisiones se incorpora en los vehículos un dispositivo llamado conversor catalítico o catalizador, el cual facilita la transformación de las sustancias contaminantes en otras que no lo son tanto, llegando a reducirse hasta un 85% de las emisiones de los gases contaminantes.

Consecuentemente para el uso de catalizadores se ha tenido que eliminar el plomo en la gasolina ya que éste los inutiliza. Por lo tanto, uno de los principales problemas de la



gasolina es el plomo, que era hasta hace unos años, el aditivo antidetonante que se añadía a la gasolina para alcanzar el poder antidetonante necesario. Pero el uso del plomo conlleva serios problemas. En primer lugar, es un elemento sumamente nocivo para los seres vivos. En segundo lugar, el plomo inutiliza los catalizadores que se usan para favorecer la combustión completa de los hidrocarburos y evitar la formación de monóxido de carbono. Estos han sido los dos motivos por los que se han sustituido el plomo de las gasolinas por otras sustancias antidetonantes, como es el MTBE, el cual evita la emisión de plomo a la atmósfera y disminuye el daño a los catalizadores, reduciéndose así la cantidad de monóxido de carbono y otros compuestos no deseables emitidos por los vehículos.

### 5.3. Gasoil

#### 5.3.1. Definición

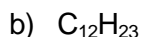
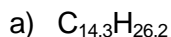
El gasoil es un combustible líquido de gran calidad obtenido como producto intermedio en la columna de destilación atmosférica del petróleo. En el campo de la automoción, se utiliza en motores de encendido por compresión, que siguen ciclo Diesel, tanto para vehículos ligeros como para vehículos pesados.

#### 5.3.2. Composición

El gasoil es una mezcla compleja de hidrocarburos compuesta principalmente de parafinas y aromáticos, con un contenido de olefina que alcanza solamente un pequeño porcentaje por volumen. El número de carbonos que lo forman se encuentra entre 10 y 22 aproximadamente.

Debido a que el petróleo no es un producto manufacturado, la composición del gasoil no es exacta. En el presente estudio se parte de 2 composiciones para realizar los cálculos pertinentes del combustible.

Las composiciones consideradas son las siguientes:



Por lo que la composición media resultante es:  $C_{13,15}H_{24,6}$



### 5.3.3. Propiedades

La cantidad y la calidad de este combustible han hecho que, junto a la gasolina, formen el monopolio de combustibles para utilizar tanto en transporte urbano público como privado. Es un combustible de mayor masa molecular, densidad y menor volatilidad que la gasolina.

El gasoil es un líquido viscoso de un tono entre transparente y ligeramente rojizo. Las propiedades físico-químicas más relevantes que definen su uso en motores de ciclo Diesel son: número de Cetano, viscosidad.

- Número de Cetano: para obtener un funcionamiento suave del motor Diesel se necesita una inflamación rápida del combustible a medida que va entrando en contacto con el aire de la cámara de combustión. Para cuantificar esta facilidad de ignición se utiliza el NM, si este valor no es lo suficientemente elevado se retrasa la combustión y esto provoca un aumento de la presión en el cilindro no deseado.
- Viscosidad: una disminución de la viscosidad del gasoil hace más fácil la pulverización del combustible, sin embargo si es demasiado baja no se consigue la lubricidad adecuada en la bomba de inyección.

Éstas y otras propiedades físico-químicas del gasoil se muestran en la Tabla 5.2.



PROPIEDADES		
PCI másico	MJ/kg	42,69
PCI volumétrico	MJ/m <sup>3</sup>	35581
Densidad	Kg/m <sup>3</sup>	840-890
Densidad relativa	-	0,84-0,89
Número de cetano	-	40-60
Viscosidad (40 °C)	cSt	3,2
Tª autoignición	°C	200-400
Curva de destilación	°C	180-360
Límites de inflamabilidad	% vol.	0,7-5

TABLA 5.2. Temperaturas de ebullición de los diferentes derivados del petróleo

Su uso en motores de encendido por compresión requiere de una elevada lubricidad y una elevada facilidad de autoencendido (medida gracias al número de cetano), y también ha de tener facilidad de vaporización en el cilindro.

#### 5.3.4. Características medioambientales

Uno de los puntos destacables que plantean la diversificación de los combustibles tradicionales son sus características medioambientales. La utilización del gasoil en motores alternativos de combustión interna provoca altas emisiones de NO<sub>x</sub> y de partículas sólidas en suspensión que afectan negativamente a la calidad atmosférica y a la salud. Además estas partículas sólidas en forma de hollín son las responsables del humo negro que desprenden los tubos de escape, de hidrocarburos no quemados y de anhídrido sulfuroso procedente del azufre contenido en el combustible.



## **6. Combustibles alternativos aplicados en motores MACI**

Durante las últimas décadas, se han realizado grandes esfuerzos hacia un avance tecnológico y mejoras en el ahorro de combustible permitiendo disponer de vehículos mejores y más eficientes. Pero estos no han sido suficientes para resolver los problemas de disponibilidad, dependencia del petróleo y contaminación asociada al transporte. Las previsiones futuras sobre el aumento de vehículos, el incremento de los problemas de contaminación y la congestión en las ciudades hace necesario definir una estrategia para reducir los impactos sociales y medioambientales del sector.

Las principales soluciones a los problemas energéticos y medioambientales del sector transporte están relacionadas con la mejora de la eficiencia de las diferentes modalidades de transporte y sobretodo con el desarrollo de nuevas tecnologías energéticas.

Si se tiene en cuenta la importancia del ámbito urbano en el sector, las actuaciones necesarias se podrían agrupar de menor a mayor importancia de la siguiente manera:

### **A. Mejorar la gestión de la movilidad:**

El aumento del nivel de vida y de la cantidad de vehículos juntamente con el crecimiento de las zonas urbanas y de un estilo de vida que hace imprescindible el uso del vehículo privado, hace que se vea necesario fomentar el transporte público, el uso de bicicletas, la conducción económica en los conductores de flotas de transporte y usuarios de vehículos privados etc... con el fin de mejorar la eficiencia energética y reducir el consumo de energía.

### **B. Incidir sobre el comportamiento de los usuarios:**

Uno de los ámbitos con un gran potencial de ahorro energético es el que hace referencia a los hábitos de conducción y de mantenimiento de los vehículos por parte de los usuarios.

La buena elección del vehículo y la realización de una conducción económica y segura, moderando la velocidad, el uso del stárter y utilizar correctamente el cambio de marchas puede reducir de un 10 a un 15% el consumo.

### **C. Conseguir vehículos más eficientes:**



La mejora de los consumos específicos, es decir, de la eficiencia energética de los diferentes modos de transporte es uno de los pasos para reducir el consumo energético de sector y ha sido objeto de amplios estudios y desarrollos por parte de fabricantes de vehículos, trenes y aviones.

La mayor parte de las mejoras para reducir el consumo de combustible ha sido en el diseño de nuevos motores de gasolina y diesel. En los últimos años, debido a la mejora del rendimiento del conjunto motor, se han conseguido reducciones en el consumo específico entre el 25 y 40%. Estas modificaciones en el diseño y la construcción se han efectuado principalmente en relación a aspectos como el peso de vehículo, la introducción de regulación electrónica, inyectores y mejora del arranque en frío y la transmisión.

La reducción del peso se ha conseguido gracias a la sustitución del acero por materiales más ligeros como aluminios y aceros ligeros (el plástico no se utiliza por cuestiones de reciclaje). Estas reducciones inciden directamente sobre las resistencias que tiene que soportar el vehículo y sobre el consumo; así una reducción de unos 80Kg en el peso de un vehículo puede aportar un ahorro de un 5% de combustible.

#### D. Desarrollar combustibles alternativos a los derivados del petróleo (gasolina-gasoil):

Las previsiones futuras sobre el aumento del número de vehículos, el incremento de los problemas de contaminación y la congestión en las ciudades han planteado la utilización de fuentes de energía alternativas a los combustibles convencionales. Entre las nuevas energías para el sector del transporte aplicado a motores MACI destacan:

- Biogás
- Biocarburantes
- Gases licuados del petróleo (GLP)
- Gas natural
- Hidrógeno

Estas opciones, que se analizarán con detalle a continuación, constituyen una solución de gran interés, tanto para la diversificación energética del sector, como para la mejora del impacto medioambiental y los avances tecnológicos que comportan.





## **6.1. Biogás**

### **6.1.1. Definición**

El biogás es un combustible gaseoso obtenido a partir de la digestión anaeróbica de subproductos y/o residuos orgánicos.

El ritmo de vida de la sociedad actual genera una gran cantidad de desechos de diversos tipos. Esta cantidad de subproductos contiene materia orgánica, y esta materia orgánica posee un poder energético potencial que puede ser aprovechado para su reutilización y así frenar el crecimiento de los residuos y sus emanaciones contaminantes a la vez.

La degradación de la materia orgánica produce una mezcla de gases denominada biogás y unos lodos residuales. El biogás está formado principalmente por metano y dióxido de carbono. El metano es el gas que le confiere las características combustibles y por lo tanto el que provoca la elección del biogás como carburante alternativo en el sector de la automoción.

### **6.1.2. Composición**

Los principales componentes del biogás son, como se ha comentado anteriormente, el metano y el dióxido de carbono, pero no son los únicos. No existe una composición única del biogás porque ésta depende de su procedencia, por esta razón se han analizado varios tipos de gas para finalmente trabajar con unos valores medios habituales.

De la composición del gas dependerá la calidad del combustible resultante. Y esta composición a su vez depende de las propiedades de la materia de la que procede. La siguiente tabla (Tabla 6.1.) muestra el porcentaje medio de los componentes característicos de un tipo de biogás que podría obtenerse de un vertedero de residuos sólidos urbanos.



COMPOSICIÓN		Porcentaje
Metano	CH <sub>4</sub>	55
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	40
Hidrógeno	H <sub>2</sub>	1
Monóxido de carbono	CO	0,5
Oxígeno	O <sub>2</sub>	1
Nitrógeno	N <sub>2</sub>	2.5

---

TABLA 6.1. Composición media del biogás.

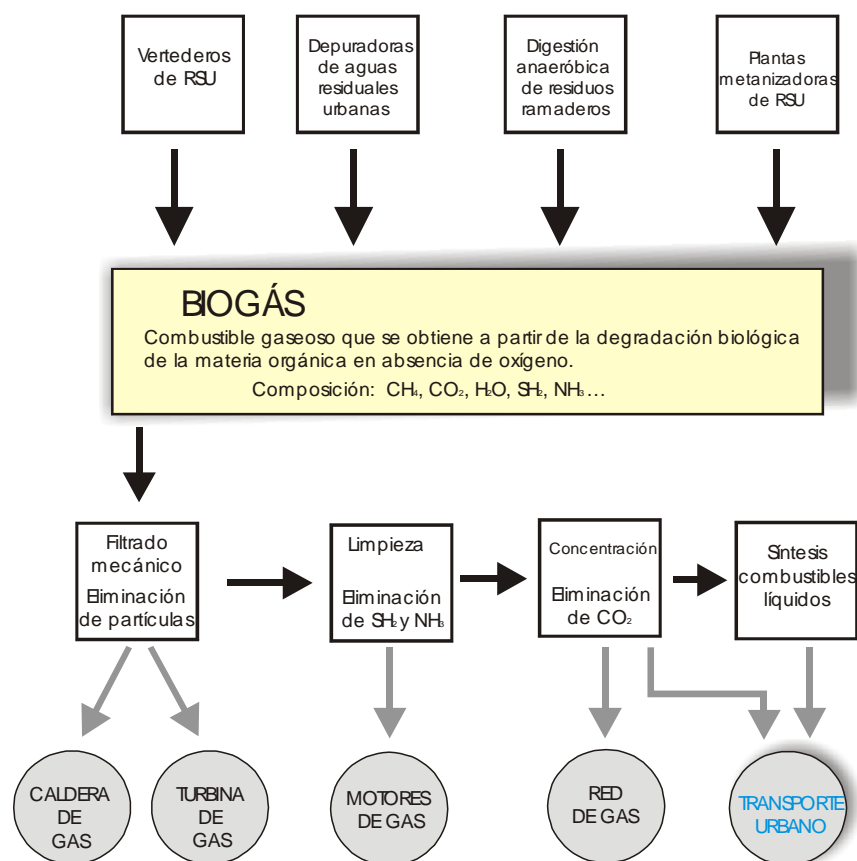
### 6.1.3. Origen y generación

El origen, la generación y las aplicaciones del biogás se muestran en la Figura 6.1, donde se observan todas sus posibles aplicaciones, de las cuales únicamente será objeto de estudio su aplicabilidad en el transporte.

Las principales fuentes de generación del biogás son:

- Vertederos de residuos sólidos orgánicos.
- Plantas metanizadoras de residuos orgánicos
- Estaciones depuradoras de aguas residuales con tratamiento biológico.
- Plantas de digestión anaeróbica con residuos de animales.





Nota RSU: residuos sólidos urbanos

Fig. 6.1. Esquema del proceso del origen, generación y aplicaciones del biogás.

Entre las posibles formas de obtener biogás, se explicará detalladamente la más común: la extracción a partir de vertederos.

La formación de gas se produce en todos los vertederos debido a la degradación de la materia orgánica allí depositada, pero su generación, la recogida de gas para su reutilización, únicamente se lleva a cabo en los vertederos adaptados a tal fin.

En el interior de los vertederos, en ausencia de oxígeno, es decir de forma anaeróbica, se desarrolla la formación de biogás de los microorganismos que degradan la materia orgánica contenida en los residuos. Debido a su degradación se generan 2 subproductos, una mezcla de gases, que es el biogás, y unos lodos que pueden reutilizarse como abono biológico.



Como la generación se produce de forma natural hay ciertos parámetros influyentes en el proceso y en la calidad del resultado. Los parámetros más importantes se refieren a la gestión y a la composición del vertido.

Sobre la gestión del vertido de los residuos, el grado de compactación del vertedero, la mezcla de distintos residuos, la recirculación de lixiviados, el sellado del vertedero, el recubrimiento diario y la edad del vertedero suponen el correcto desarrollo del proceso de fermentación de la materia orgánica para la formación del biogás.

La composición de los residuos del vertedero va a influir en la calidad del gas, es decir, el porcentaje de materia orgánica biodegradable, la humedad del residuo (también la humedad del lecho del vertedero) y la presencia de nutrientes o inhibidores.

A parte de las condiciones propias del vertedero y del residuo también los factores ambientales influirán en la generación, pudiendo destacar el nivel de lluvias y los cambios de temperatura.

Una vez generado el biogás la obtención se lleva a cabo mediante unas instalaciones desgasificadoras capaces de recogerlo y transportarlo hasta su almacenaje.

Primero se realiza la captación de gases gracias a una red de pozos verticales y/o zanjas horizontales. Esta red de pozos y zanjas contiene las tuberías correspondientes que se encargarán de recoger los gases formados en el vertedero mediante las ranuras que se distribuyen a lo largo de su longitud. Estas tuberías se rasuran de un 20 a un 30 % de su longitud para una recolecta adecuada del gas. Las superficies de los pozos son selladas para evitar posibles entradas de oxígeno al caudal de gas y posibles salidas del mismo al exterior.

A continuación hay que trasladar el gas desde la superficie de los pozos hasta los colectores principales, se trata de la conducción y control de los gases. Se disponen una serie de tuberías desde la salida de los pozos hasta los colectores de manera que se pueda conducir el gas y a la vez mantener un control de los caudales que se van aportando. El control consiste en la toma de mediciones, ya sea de manera automática o manual, de los parámetros más significativos del gas: caudal, presión, niveles de oxígeno y porcentaje de metano.

Y como último paso hay que transportar el gas hasta la estación de aspiración. Esta fase se realiza mediante colectores de mayor diámetro a donde van a parar las tuberías que contienen el biogás.



#### 6.1.4. Propiedades

Una característica primordial para el uso del biogás es su condición de fuente renovable, y por lo tanto nula en el balance de energía primaria.

Las propiedades energéticas del biogás y su rendimiento económico serán los parámetros decisivos en su desarrollo como combustible alternativo.

El poder calorífico del biogás depende de la cantidad de metano que contenga. Si no se consigue tener un contenido de al menos el 50% en metano, el biogás no es inflamable y por lo tanto su utilidad como combustible pierde su valor. Por esta razón el tiempo de retención en el vertedero ha de ser mayor a 5 días. A su vez, el contenido en metano también depende de la temperatura de fermentación de los lixiviados.

Si las temperaturas son bajas, la proporción de  $\text{CH}_4$  es más elevada, pero en contra se obtiene menos cantidad de gas.

A continuación se muestran las propiedades físico-químicas más importantes:

- PCI biogás → 18.86 MJ/m<sup>3</sup> (en condiciones normales)
- Densidad → 1.23 kg/ m<sup>3</sup>
- Densidad relativa → 0.953
- Número de octano → 162.53
- Punto de inflamación → 700°C

El principal problema de los vertederos radica en la formación de lixiviados y gases, en primera instancia, no aprovechables. Utilizar el biogás como combustible alternativo supone un aprovechamiento energético de un producto residual. El metano y el dióxido de carbono que se generan en los vertederos contribuyen al efecto invernadero, reutilizar estos gases supone, también, un paso hacia delante en el desarrollo sostenible.



### **6.1.5. Características de aplicabilidad en MACI**

El uso del biogás en el sector transporte es más eficiente si se convierte en un gas similar al gas natural, por lo tanto se trata de eliminar todos los compuestos diferentes al gas natural (metano) como son el  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ , entre otros. Consecuentemente, al igual que el gas natural, el uso del biogás en la automoción se lleva a cabo mediante motores de ciclo Otto.

Una vez transformado, su aplicabilidad en la automoción es la misma que el gas natural, puede ser almacenado o transportado, comprimido o licuado.

Actualmente, el biogás que se utiliza como combustible en vehículos, es para flotas de vehículos cercanas a las fuentes de biogás (como plantas de tratamientos de aguas residuales y de vertederos), ya que los vehículos no pueden recorrer largas distancias debido a la inexistencia de estaciones de servicio.

### **6.1.6. Características medioambientales**

Las principales ventajas medio ambientales del biogás en el transporte:

- Un efecto incremental nulo respecto el ciclo de  $\text{CO}_2$ .
- Niveles de emisión de gases disminuyen.
- Reducción en el nivel de ruido del motor.

Los efectos medioambientales del biogás se analizarán con más detalle en otro capítulo del proyecto.

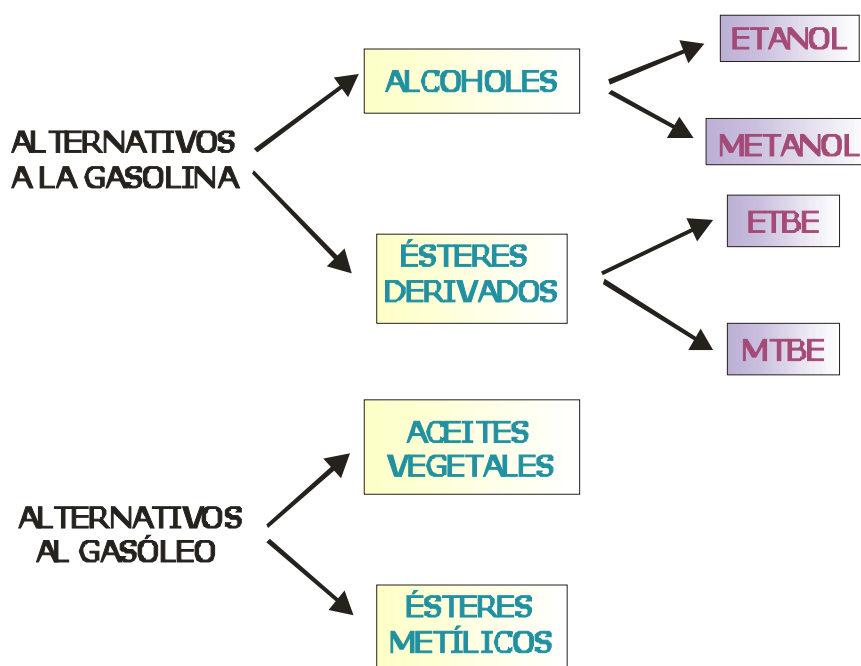
## **6.2. Biocarburantes**

Los biocarburantes, también denominados biocombustibles líquidos, son productos obtenidos a partir de materias primas de origen agrícola. Estos cultivos que están destinados a la producción de biomasa con fines energéticos se pueden clasificar en tres tipos dependiendo del destino final de la biomasa:



- Oleaginosos: se emplea en la producción de aceite para ser quemado directamente o para ser transformado en biodiesel, el cual será quemado para sustituir parcial o totalmente a la gasolina.
- Alcohólicos: se suelen utilizar para la producción de alcoholes con el fin de sustituir parcialmente a la gasolina o totalmente, así como para producir componentes antidetonantes sustitutivos del plomo como el ETBE.
- Lignocelulósicos: se utilizan con fines térmicos para la producción de biocombustibles sólidos.

Los biocarburantes se pueden distinguir según sean alternativos a la gasolina o al gasóleo, tal y como se esquematiza en la Figura 6.2.



Nota: ETBE significa etil terbutil éter y MTBE significa metil terbutil éter.

Fig. 6.2. Clasificación de los biocarburantes según sean alternativos a la gasolina o al gasoil.



## **6.2.1. Biodiesel**

### **6.2.1.1. Definición**

El biodiesel es un combustible producido a partir de aceites vegetales, grasas animales y sus ésteres metílicos que se puede utilizar en cualquier motor diesel. Químicamente el biodiesel está formado por ésteres de alquilo, de metilo y de etilo.

Según la ASTM (American Society for Testing and Materials) el biodiesel es “el éster monoalquílico de cadena larga de ácidos grasos derivados de recursos renovables, como por ejemplo aceites vegetales o grasas animales, para utilizarlos en motores Diesel”.

Los aceites probados y utilizados para biodiesel son básicamente aquellos que abundan en cada una de las zonas que desarrollan este biocarburante. Por ejemplo: en Estados Unidos el aceite de Soja es el que más se utiliza, en Europa el de colza y girasol, en los países de clima de tropical, se está investigando el de aceite de palma y el de coco.

### **6.2.1.2. Composición**

Los aceites vegetales (oliva, girasol, colza, palma, etc.) están formados por moléculas de triglicéridos de ácidos grasos (entre 14 y 22 carbonos), mono y triglicéridos, en una pequeña proporción, y algunos elementos que se eliminan en el proceso de refinamiento. La composición del biodiesel puede variar en función de su procedencia, pero se acepta en promedio la siguiente:  $C_{18,7}H_{34,9}O_2$

Esta mezcla de ésteres, a pesar de no tener una composición química similar a la de los gasóleos (que son hidrocarburos saturados) por contener oxígeno, tiene unas propiedades físicas muy similares, lo que hizo pensar que podría utilizarse como sustituto de aquellos, como combustible e incluso como carburante en motores diesel.

### **6.2.1.3. Origen**

El biodiesel, que es considerado como un éster similar al vinagre, se obtiene a partir de una serie de aceites vegetales, fundamentalmente de sus semillas y de los frutos de plantas, aunque se puede obtener a partir de más de 300 especies vegetales.

Inicialmente, se tienen que conseguir los aceites vegetales que contienen las semillas oleaginosas mediante una extracción química a través de procesos de compresión, extracción o pirolisis. Con este proceso, se obtiene el aceite bruto sin refinar, el cual puede





ser utilizado directamente como combustible en motores, pero éstos se tienen que someter a grandes transformaciones.

Después de la depuración de los aceites, se pasa a una etapa conocida como “transesterificación”, en la cual se sustituye el alcohol del aceite vegetal (glicerol) por otro más simple, como es el metanol o etanol. A partir de este proceso, y tras una transformación química importante, se obtienen ésteres grasos, habiendo previamente separado el glicerol. Posteriormente se debe unir los ácidos grasos al otro alcohol (metano o etano) para así obtener finalmente el biodiesel. En la Figura 6.3. se esquematiza dicho proceso.



Fig. 6.3. Esquema del proceso de obtención del biodiesel.

El esquema general de la reacción es el que se muestra en la Figura 6.4:

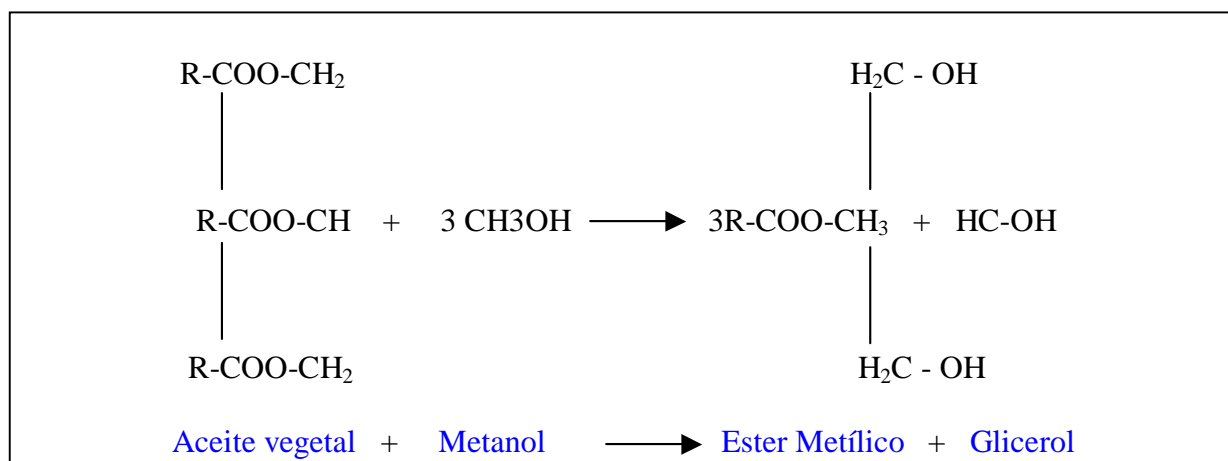


Fig. 6.4. Reacción de transesterificación.



R son cadenas lineales con o sin enlaces dobles y cuyo número de átomos de carbono más habitual es 17, aunque puede variar entre 15 y 23 dependiendo si se trata de un aceite vegetal o una grasa.

La reacción de transesterificación es reversible, no requiere mucha energía y no genera subproductos nocivos. En el caso de la glicerina, obtenida a partir del glicerol, representa un subproducto muy valioso que de ser refinada a grado farmacológico puede llegar a cubrir costos operativos de una planta productora.

#### **6.2.1.4. Propiedades**

Las propiedades físico-químicas más características del biodiesel para su utilización en el transporte son:

- Peso molecular aproximado: 296
- Aspecto: amarillo claro brillante (según el aceite utilizado)
- Punto de inflamación: mayor a 100 °C
- No contiene azufre ni aromáticos.
- Lubricidad: más de 6.000 gramos BOCLE.
- Viscosidad: 4, 5 cSt.
- Número de cetano: 47-56 (según aceite empleado y proceso)
- Presión de vapor: menor a 5 mm Hg.
- Contenido de agua y sedimentos máximo 0,05 (medido como porcentaje).
- Densidad relativa con respecto al agua está entre 0,875 y 0,900.

El biodiesel posee como características destacables su biodegradabilidad y el hecho de ser un combustible no tóxico.

Una de las principales ventajas que aporta su consumo es que se obtiene a partir de cultivos que abundan en los diferentes países del mundo, con lo que representa un gran beneficio económico para el país.



Resulta seguro manejar y transportar el biodiesel, se guarda en tanques similares a los del gasoil, no son tóxicos y no forman mezclas explosivas con el aire.

Debido a la similitud con las propiedades del combustible diesel de petróleo los ésteres grasos también se pueden mezclar en cualquier proporción. Al porcentaje de biodiesel puro que se encuentra en el combustible, se le denomina porcentaje de biomasicidad o, simplemente, bioesteraje.

Por lo tanto podemos encontrar el biodiesel B30, el cual contiene un 30% de ésteres grasos y un 70% gasóleo. Este tipo de diesel es el más adecuado para que lo consuman los coches que tengan los manguitos de caucho natural.

La mezcla más común es de un 20% de biodiesel con un 80% de gasóleo, la cual es conocida como Biodiesel B20.

El biodiesel B100 tiene un bioesteraje del 100%, por lo tanto solo contiene ésteres grasos. Los coches que tienen manguitos de caucho sintético son los únicos que lo pueden utilizar.

#### **6.2.1.5. Características de aplicabilidad en motores MACI**

El biodiesel es el único combustible alternativo, que sin ser necesaria ninguna modificación, funciona en cualquier motor diesel convencional. Cualquier motor que consuma gasóleo puede utilizar el biodiesel, bien como B100 (transesterificado) o mezclarse sin transesterificar en altas proporciones con gasóleo.

El biodiesel posee una lubricidad de 6 mil veces superior que la del gasoil, por ese motivo consigue aumentar la vida útil de los motores. Por otra parte no se encuentran diferencias con respecto al consumo, encendido, rendimiento, y al par motor.

El biodiesel es un combustible probado satisfactoriamente en Europa durante más de veinte años y en más de 15 millones de kilómetros en EE.UU.

#### **6.2.1.6. Características medioambientales**

Las principales características medioambientales se detallan a continuación:

- El ciclo biológico en la producción y en su uso, reduce aproximadamente en 80% las emisiones de anhídrido carbónico, y casi el 100% las de dióxido de azufre.
- Gracias a su combustión, se disminuye en 90% la cantidad de hidrocarburos totales no quemados, y entre el 75-90% en los hidrocarburos aromáticos.



- En comparación con el diesel, proporciona significativas reducciones en la emanación de monóxido de carbono y de partículas.
- Dependiendo del tipo de motor el biodiesel, proporciona una ligera variación en la emisión de óxidos de nitrógeno.

## **6.2.2. Alcoholes**

### **6.2.2.1. Definición**

El metanol y el etanol son los principales alcoholes aplicables a motores de combustión interna. En algunos países se han experimentado y planteado otro tipo de alcoholes, como el isobutanol, el glicol, el n-butanol y el alcohol terbutílico, que su incidencia real ha sido poco significativa, además de ser de origen petroquímico. Parece ser que el dimetil éter, que es gaseoso, está siendo estudiado como posible carburante por algunos países.

Hay tres razones fundamentales para explicar el predominio de los alcoholes con uno o dos átomos de carbono:

- La fabricación y la inflamabilidad son conocidas desde la antigüedad.
- Son líquidos a la temperatura ambiente, su volatilidad es razonable y sus cualidades como combustibles son buenas.
- Se pueden obtener fácilmente de la fermentación y/o destilación de productos orgánicos.

Debido a las excelentes características del etanol derivado de materia vegetal, conocido como bioetanol, se profundizará más en éste último.

A modo visual, antes de empezar la descripción detallada de cada combustible, se muestra en las Figuras 6.5 y 6.6. un pequeño resumen.



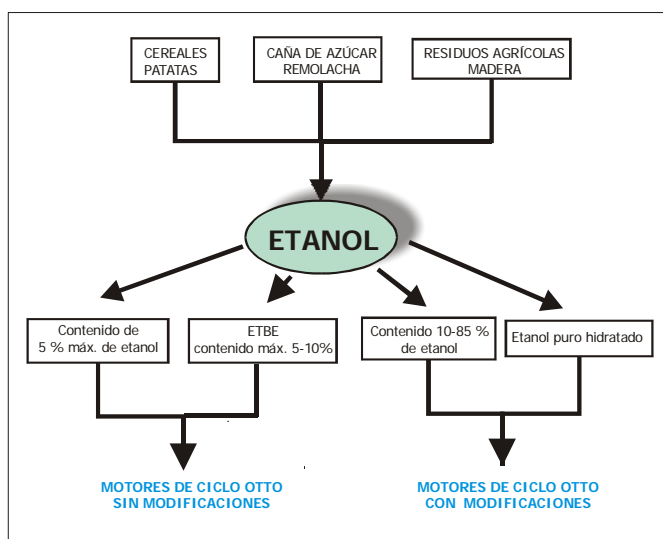


Fig. 6.5. Procedencia y aplicación del etanol en motores MACI

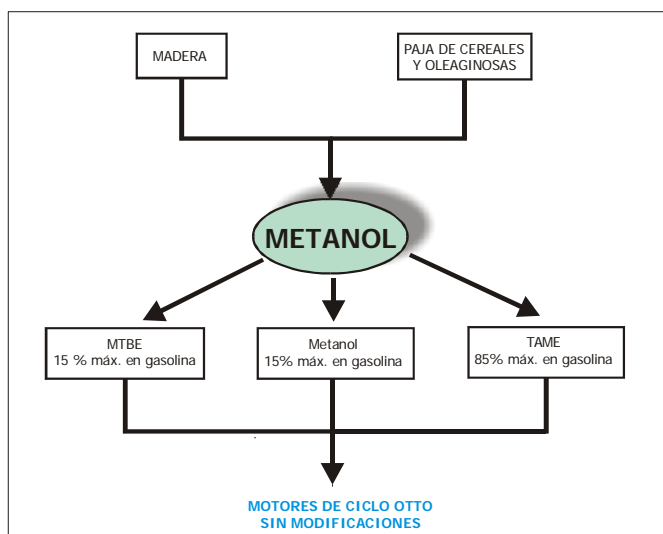


Fig. 6.6. Procedencia y aplicación del metanol en motores MACI

### 6.2.2.2. Composición química

Los alcoholes contienen una cadena de hidrocarburo con un radical OH unido a un átomo de carbono. En cambio los ésteres son productos orgánicos derivados de los alcoholes, los cuales contienen un átomo de oxígeno en vez de un radical OH.



Los principales productos posibles clasificables como “oxigenados”, que son líquidos a temperatura ambiente son:

- El metanol:  $\text{CH}_3\text{-OH}$  y el etanol:  $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-OH}$
- Otros alcoholes simples
- El alcohol terbutílico (TBA)
- Los ésteres: etil terbutil éter (ETBE), metil terbutil éter (MTBE) o el metil teramil éter (TAME).

### 6.2.2.3. Obtención de los alcoholes

La mezcla de los diferentes alcoholes pueden obtenerse a partir de gas de síntesis, que se obtiene de reformado con vapor del gas natural, de una oxidación parcial de una mezcla de hidrocarburos o a partir de la gasificación de carbón o de madera.

El metanol y el etanol son los únicos que pueden ser obtenidos a partir de la biomasa, los demás compuestos se obtienen de procesos petroquímicos a partir de destilación del petróleo o a partir de gas de síntesis de carbón o gas natural.

- *Obtención de etanol:*

El etanol se puede obtener por síntesis o por fermentación, pero en el caso de utilización del etanol como carburante, el método más razonable es por fermentación. El proceso básico es la fermentación alcohólica de los azúcares de la materia vegetal.

La producción del etanol implica disponer de biomasa leñosa residual o cultivable o bien la producción masiva de vegetales ricos en azúcares y/o almidón. Por lo tanto se pueden obtener de diversas fuentes:

- Materias ricas en almidón como los cereales (maíz, trigo, cebada...) y los tubérculos (yuca, camote, papa, malanga...).
- Materias ricas en sacarosa como la caña de azúcar, la remolacha, etc.
- Materias ricas en celulosa como la madera y los residuos agrícolas.

El 40% del etanol producido en el mundo es a partir de cereales, aunque en los últimos 5 años las nuevas plantas construidas únicamente utilizan esta materia prima. En EEUU se utiliza el maíz y la soja y en Europa el trigo, la cebada, el centeno y el alcohol vínico.



En Europa la máxima productividad de etanol es a partir de caña de azúcar, ya que se producen una media 5150 Litros de etanol / hectárea. Como consecuencia de este dato, se explicará brevemente como es el proceso de la extracción de etanol a partir de caña de azúcar. Consta de las siguientes etapas:

1. Molienda
2. Extracción del azúcar
3. Producción de azúcar bruto
4. Fermentación de melaza
5. Destilación
6. Desnaturalización

En el caso de la obtención a partir de cereal, se utilizaría el proceso anterior, más una última fase de hidrólisis del almidón, convirtiéndose en glucosa y a partir de ésta por fermentación anaeróbica, se produce el etanol.

Existe un proceso de producción de etanol a partir de biomasa lignocelulósica (leñosa), el cual no está implantado en el ámbito industrial, aunque se han realizado muchas experiencias pilotos en laboratorios. El interés de este proceso es debido a que la materia prima es más barata que los cereales, existen posibilidades de reducir más los costes mejorando los cultivos, no se compite en el mercado alimentario y es un recurso muy extendido.

La producción de etanol por fermentación de materia orgánica, o también llamado bioetanol, necesita de energía de baja calidad para generar la energía necesaria para el proceso. Esta condición la cumple muy bien la caña de azúcar donde la energía del proceso se genera por la combustión del bagazo (sólidos extraídos de la caña de azúcar), pero en el caso del cereal es imprescindible la utilización de energías externas (en Europa gas natural) y también procurar aprovechar los flujos internos de energía.

En el proceso de obtención de etanol, se debe evitar utilizar energías fósiles, como son el carbón, gasóleo, etc., aprovechando la mayor parte de los residuos orgánicos para producir la energía necesaria para el proceso de hidrólisis y fermentación, así como disponer de eficientes sistemas de cogeneración. De esta manera se puede justificar la utilización del etanol como combustible en automoción, ya que se reduce la emisión de CO<sub>2</sub>.

- *Obtención de metanol:*



El metanol se obtiene generalmente a partir de madera, paja de cereales u oleaginosos. La obtención del metanol se realiza desde el año 1925 mediante una reacción catalítica del gas de síntesis, es decir una mezcla de CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>. Para obtener el gas de síntesis se pueden utilizar tres tipos de procedimientos:

- Reformado por vapor del gas natural
- Oxidación parcial de una mezcla de hidrocarburos
- Gasificación del carbón

Dicha obtención representa más del 80% de la inversión de una unidad de producción de metanol.

#### **6.2.2.4. Propiedades**

El *metanol* es una molécula de pequeño tamaño, constituido por el 50% de su peso molecular de oxígeno y forma un grupo hidroxilo que, en comparación con los demás hidrocarburos, hace que sea una molécula fuertemente polar. Estos factores causan las importantes diferencias entre las propiedades del metanol comparándolo con los carburantes convencionales. El *etanol* es más parecido a un hidrocarburo, ya que tiene un enlace carbono-carbono.

A continuación en la Tabla 6.2. se muestran las características físicas y químicas más significativas del etanol y el metanol:





Propiedad	Unidad	Metanol	Etanol(anhidro)
Fórmula química		CH <sub>4</sub> O	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O
Densidad (líquido a 15°C)	kg/dm <sup>3</sup>	0,796	0,794
Temperatura de ebullición	°C	64,7	78,3
Presión de vapor Reid (a 37,8°C)	kPa	32	16
Calor latente de vaporización	kJ/kg	1.100	854
Poder calorífico inferior másico	kJ/kg	19.937	26.805
Poder calorífico inferior volumétrico	kJ/dm <sup>3</sup>	15.870	21.285
Número de octano Research	RON	120	120
Número de octano motor	MON	87	87
Número centano	NC	0- (-3)	5
Número de metano	NM	70	70

TABLA 6.2. Tabla de propiedades físico-químicas del metanol y el etanol

#### 6.2.2.5. Características de aplicabilidad en MACI

La utilización de los alcoholes es más apropiada en motores de encendido de provocado, ya que, fundamentalmente tienen una alta volatilidad y su número de octano es alto, además de tener un número de cetano bajo. Es por eso que su utilización mayoritariamente es motores Otto. No obstante, resulta muy interesante la utilización de etanol y metanol en motores diesel por su mayor rendimiento térmico debido a su capacidad por tener mayor relación

de compresión y a no necesitar estrangular la admisión para regular la carga. Este es uno de los motivos por los que actualmente se están desarrollando motores diesel alimentados por etanol mezclados con otros productos para adaptar sus propiedades a estos motores.

La utilización de etanol u otros compuestos oxigenados se pueden contemplar desde tres puntos de vista:



- Mezclas de etanol o metanol (u otros compuestos oxigenados como son el MTBE o el ETBE) con gasolina convencional en porcentajes más pequeños del 5-10%. En Europa se admiten hasta un 5% de oxigenados en la gasolina comercial sin plomo. Actualmente se esta sustituyendo la mezcla de MTBE por ETBE, debido a su origen vegetal y a su mayor porcentaje de degradabilidad.
- Mezclas de etanol en porcentajes entre 10-85 %, para las cuales son necesarias modificaciones apreciables en el vehículo con respecto a uno de gasolina.
- Etanol puro hidratado que necesita modificaciones importantes en el vehículo.

Hoy en día se pueden encontrar diversas maneras de presentación de carburantes basados en etanol:

- Gasolinas oxigenadas: contiene como máximo un 5% de etanol, por lo tanto no son necesarias modificaciones en el motor.
- Gasohol: se pueden encontrar dos filosofías; una de mezclas de hasta un 10%(E10) y otra de mezclas de hasta un 100% de etanol, donde ya es necesario motores adaptados.
- ETBE: producto muy similar a la gasolina, el cual se obtiene por síntesis del bioetanol con el isobutileno, subproducto de la destilación del petróleo. Se utiliza en motores de ciclo Otto con concentraciones de hasta un 15%. Dicha adición sirve para aumentar el índice de octano de la gasolina, evitando la adición de sales de plomo.
- MTBE: producto de la reacción del isobuteno (derivado del petróleo, no renovable) y del metanol. Este es un componente muy habitual de las gasolinas sin plomo.
- TAME: compuesto por la reacción entre metano y isopenteno. Se utiliza con un máximo del 85% en gasolina.
- E100/E95: etanol casi puro deshidratado o hidratado respectivamente. Se puede utilizar en motores Otto especialmente adaptados. Para motores diesel se utiliza el etanol puro deshidratado con aditivos especiales.
- Diesohol: Se está estudiando en EE.UU. y Brasil con mezclas de E3 a E15 en el gasóleo para vehículos pesados.

#### **6.2.2.6. Características medioambientales**

La principal ventaja medioambiental de estos combustibles radica en su origen. Los biocarburos, tal y como se ha detallado anterioridad, provienen mayoritariamente de la



biomasa, la cual ha extraído parte del dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) que se podría liberar en la atmósfera. Por eso, la utilización de los biocarburantes como combustibles no comporta un aumento neto de dióxido de carbono de la atmósfera, de manera que contribuye a minimizar el efecto de los gases invernadero.

Asimismo la producción de biocarburantes supone una alternativa de uso del suelo que evita los fenómenos de erosión y desertificación a los que pueden quedar expuestas aquellas tierras agrícolas que, por razones de mercado, están siendo abandonadas por los agricultores.

## 6.3. Gases Licuados del Petróleo (GLP)

### 6.3.1. Definición

Las siglas GLP designan una serie de gases que se obtienen en la destilación del petróleo. Los GLP son subproductos o derivados del petróleo que se almacenan y transportan en forma líquida (de ahí el nombre) aunque van siempre acompañados de una bolsa o cámara de fase gaseosa.

Los gases licuados del petróleo pertenece a la llamada tercera familia de gases la cual se define como: la formada por el butano y el propano, como productos derivados de la destilación del petróleo y que se conservan en forma líquida en depósitos (aparte de una pequeña fracción en forma gaseosa) y de lo cual se deducen las siglas que los identifican GLP (Gases Licuados del Petróleo).

### 6.3.2. Composición

Es un combustible que tiene una composición química donde predominan los hidrocarburos butano y propano o sus mezclas, la cual contiene impurezas principales, como son el propileno o butileno o una mezcla de estos.

Los gases butano y propano, en estado puro, son hidrocarburos del tipo  $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$  :

Butano:  $\text{C}_4\text{H}_{10}$

Propano:  $\text{C}_3\text{H}_8$

La composición más habitual de los GLP, es un 40% de butano y un 60% de propano, aunque en este estudio también se analizarán las propiedades de cada compuesto por separado.



### 6.3.3. Obtención

Las fuentes de obtención de este combustible son de refinerías y de plantas de proceso de gas natural, las cuales aportan alrededor de un 25% y 75% respectivamente.

Es un hidrocarburo (Hidro = Hidrógeno + Carburo = Carbono) derivado del petróleo, que se obtiene tal y como se ha dicho anteriormente durante el proceso de refinación de otro derivado llamado gasolina. Su nombre, Licuado del Petróleo, proviene de convertir el estado gaseoso en que se encuentra en líquido mediante compresión y enfriamiento simultáneos de estos vapores, necesitándose 273 litros de vapor para obtener 1 litro de gas líquido.

El petróleo se somete a una operación denominada destilación, mediante la cual se van separando ordenadamente, de acuerdo con sus densidades y puntos de ebullición, los diversos componentes: gasolinas ligeras, kerosenos, butano, propano, gas-oil, fuel-oil y aceites pesados.

Los gases derivados de esta destilación que forman el grupo de los GLP son el butano (40%) y el propano (60%), que se distinguen entre sí por su composición química, presión, punto de ebullición y en su poder calorífico.

La obtención del GLP a partir de gas natural es conocida como proceso de licuefacción del gas licuado del petróleo. Dicho proceso es explicado a continuación.

El gas que se envía a plantas de proceso está constituido por metano, etano, propano, butano e hidrocarburos más pesados, así como por impurezas tales como el azufre.

En una primera etapa la corriente del gas pasa a una planta endulzadora, lugar donde se elimina el azufre. Posteriormente se introduce en una planta criogénica, en la cual mediante enfriamiento y expansiones sucesivas se obtienen dos corrientes, una gaseosa formada básicamente por metano (gas residual) y la otra líquida (licuables).

En el proceso siguiente de fraccionamiento, la fase líquida se separa en diferentes componentes: etano, gas LP y gasolinas naturales.

Para facilitar su transporte y almacenamiento, el gas licuado del petróleo que se encuentra en estado gaseoso a condiciones normales de presión y temperatura, se licua y se utiliza a bajas presiones (entre 5 y 9 bar) para así mantenerla en su estado. El almacenamiento se realiza en tanques o en depósitos.

Los elementos necesarios en una estación de suministro de GLP son:



- Zona de almacenamiento de GLP (depósitos dimensionados en función del número de vehículos).
- Estación de bombeo: formada por las bombas y red de tuberías para llevar el gas en fase líquida hasta los surtidores.
- Zona de equipos de surtidores, que normalmente son isletas para la colocación de los surtidores de GLP.

#### **6.3.4. Propiedades**

Algunas de sus propiedades más significativas son las siguientes:

- ❖ No son tóxicos ni corrosivos, solo se desplaza el oxígeno, por lo que no es propio para respirarlo mucho tiempo.
- ❖ No contiene plomo ni ningún aditivo añadido.
- ❖ No contiene azufre en su composición.
- ❖ Son inodoros e incoloros, sin embargo para detectar su fuga se le añaden sustancias que producen un olor fuerte y desagradable.
- ❖ Son más pesados que el aire, si tienen alguna pequeña fuga pueden extenderse por el suelo y los fosos de inspección.
- ❖ El GLP es un combustible económico, por su rendimiento en comparación con otros combustibles.
- ❖ Es excesivamente frío, porque cuando se ha licuado se le ha sometido a muy bajas temperaturas de bajo 0°. Por lo tanto el contacto con la piel produce quemaduras de la misma manera que lo hace el fuego.

#### **6.3.5. Características de aplicabilidad en MACI**

Los GLP son combustibles aptos para motores de Ciclo Otto, pero estos tienen que someterse a una serie de adaptaciones en el sistema de inyección. También se puede usar en motores diesel transformados, aunque permite utilizar catalizadores de tres vías, con lo que se consigue reducir las emisiones de CO, NO<sub>x</sub> e hidrocarburos no quemados.



La importancia de la no variabilidad en la calidad del gas suministrado reside en que de esta manera, el fabricante puede poner a punto el vehículo para así alcanzar unos niveles óptimos de seguridad, prestaciones del vehículo y emisiones contaminantes, y que estos niveles se mantengan durante su uso.

El uso del GLP a nivel de autobuses urbanos permite alcanzar, en la actualidad, niveles de emisiones mucho más reducidas que cualquier tecnología avanzada del diesel en los próximos años.

Los GLP destinados al transporte representa el menos significativo de todos sus usos (comercial, agrario, petroquímica, industrial...), pero es que presentaría mayor potencial para poder aumentar la demanda.

Estos, considerados como combustibles alternativos, son utilizados por todo el mundo (Norteamérica, Italia, Francia, España, Oceanía). En España su utilización en automoción ha estado restringida al transporte público (taxis y autobuses).

Si se consideran los motores utilizados con GLP para vehículos destinados al transporte se encuentran una serie de ventajas técnicas frente a otros combustibles, como son:

- Una mezcla homogénea, controlada y bien distribuida con el aire comburente en los cilindros, facilitando así una combustión más completa.
- La combustión del GLP, no genera el tipo de carbón en la cámara de admisión que hace que la vida de las bujías sea menor, por ello la vida útil se prolonga a más del doble de tiempo.
- Los aceites lubricantes del motor se mantienen limpios más tiempo debido a la ausencia de depósitos carbonosos.
- Mayor potencia y un par motor mayor a carga parcial (arranques, aceleraciones, deceleraciones y paradas).

Actualmente el GLP es utilizado como carburante en el transporte público, entre otras, en dos ciudades europeas, Viena con 500 autobuses y Valladolid con una flota de 75 autobuses, siendo los resultados obtenidos muy satisfactorios.

#### **6.3.6. Características medioambientales**

Una de sus ventajas ambientales es su baja tendencia a formar ozono troposférico, prácticamente la mitad que la gasolina, y casi no tiene emisiones de poliaromáticos y



aldehídos. Además su contaminación acústica se ve reducida en un 50%, en comparación con el diesel.

La utilización del GLP no genera emisiones de  $\text{SO}_2$  (dióxido de azufre) culpable junto los  $\text{NO}_x$  de la lluvia ácida, elimina los olores y humos de aceleración característicos de los motores diesel y reduce a niveles mínimos las vibraciones del motor.

En general, las emisiones emitida por los vehículos ( $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{HC}$ , partículas y  $\text{CO}_2$ ) se ven disminuidas cuando utilizan GLP, la reducción de estas depende de la tecnología utilizada en el motor (carburación, inyección...).

## **6.4. Gas Natural**

### **6.4.1. Definición**

El gas natural es la fuente de energía fósil que ha evolucionado más desde los años 70, la cual actualmente representa la quinta parte del consumo energético mundial.

Se conoce al término de gas natural a las mezclas de gases combustibles, hidrocarburos o no, que se encuentran en el subsuelo, aunque se puedan considerar como gases naturales todos aquellos que se encuentren de forma natural en la Tierra, desde los constituyentes del aire hasta las emanaciones gaseosas de los volcanes.

El gas natural es la mezcla de hidrocarburos gaseosos en la que predomina fundamentalmente el metano (en proporción superior al 80%), que se encuentra en la naturaleza en yacimientos subterráneos, bien solo o bien compartiendo los mismos con petróleo.

### **6.4.2. Composición**

El gas natural es el primer miembro de la familia de los alcanos que en condiciones atmosféricas se presenta en forma gaseosa.

Su composición, que varía en función de la procedencia del yacimiento, nunca es constante. Así pues, los valores de la composición y las propiedades del mismo, serán una media de los gases naturales escogidos.



El gas natural puede ser “húmedo”, en caso de contener hidrocarburos líquidos en suspensión, o seco, si no los contiene.

Es una mezcla de hidrocarburos ligeros, tal y como ya se ha dicho, compuesto principalmente de metano, etano, propano, butanos y pentanos. También se encuentran otros componentes como el  $\text{CO}_2$ , el helio, el sulfuro de hidrógeno y el nitrógeno.

En España la composición de los suministros de Gas Natural oscila entre los valores del Tipo 1 y el Tipo 2 mostrado en la Tabla 6.3.

COMPOSICIÓN (%)		TIPO 1	TIPO 2	MEDIA
Metano	$\text{CH}_4$	85,2	91,4	88,3
Etano	$\text{C}_2\text{H}_6$	13,6	7,2	10,4
Hidrocarburos superiores		0,4	0,8	0,6
Nitrógeno	$\text{N}_2$	0,8	0,6	0,7

TABLA 6.3. Composiciones del gas natural

Nota: para efectos de cálculo se supone un contenido en metano del 90% en volumen.

Por lo tanto el gas natural posee una estructura de hidrocarburo simple, compuesto por un átomo de carbono y cuatro átomos de hidrógeno ( $\text{CH}_4$ ).

La importancia del gas natural como carburante radica en la proporción de metano que contiene y en los demás hidrocarburos superiores, ya que le confieren su carácter combustible. Los demás componentes son elementos inertes porque no intervienen en la combustión, como el  $\text{N}_2$  y el  $\text{CO}_2$ , o son perjudiciales, como el  $\text{SH}_2$ , y es necesario eliminarlos.

#### 6.4.3. Obtención

El gas natural se encuentra en todo el mundo, ya sea en los depósitos situados en las profundidades de la superficie terrestre, o en los océanos. Se obtiene directamente de la tierra, sin necesidad de ningún tipo de fabricación. Se encuentra en las cavidades intersticiales, donde se pueden formar grandes cantidades de gas. Por lo general, se encuentra en yacimientos de petróleo o cerca de ellos, aunque también se puede encontrar





solo. Se llama gas “asociado” cuando se encuentra en presencia de petróleo bruto y “no asociado” cuando se encuentra solo.

El proceso de producción del gas natural es simple y muy parecido al del petróleo. En la Figura 6.7. se esquematiza el recorrido del gas natural, desde su exploración hasta sus posibles aplicaciones.

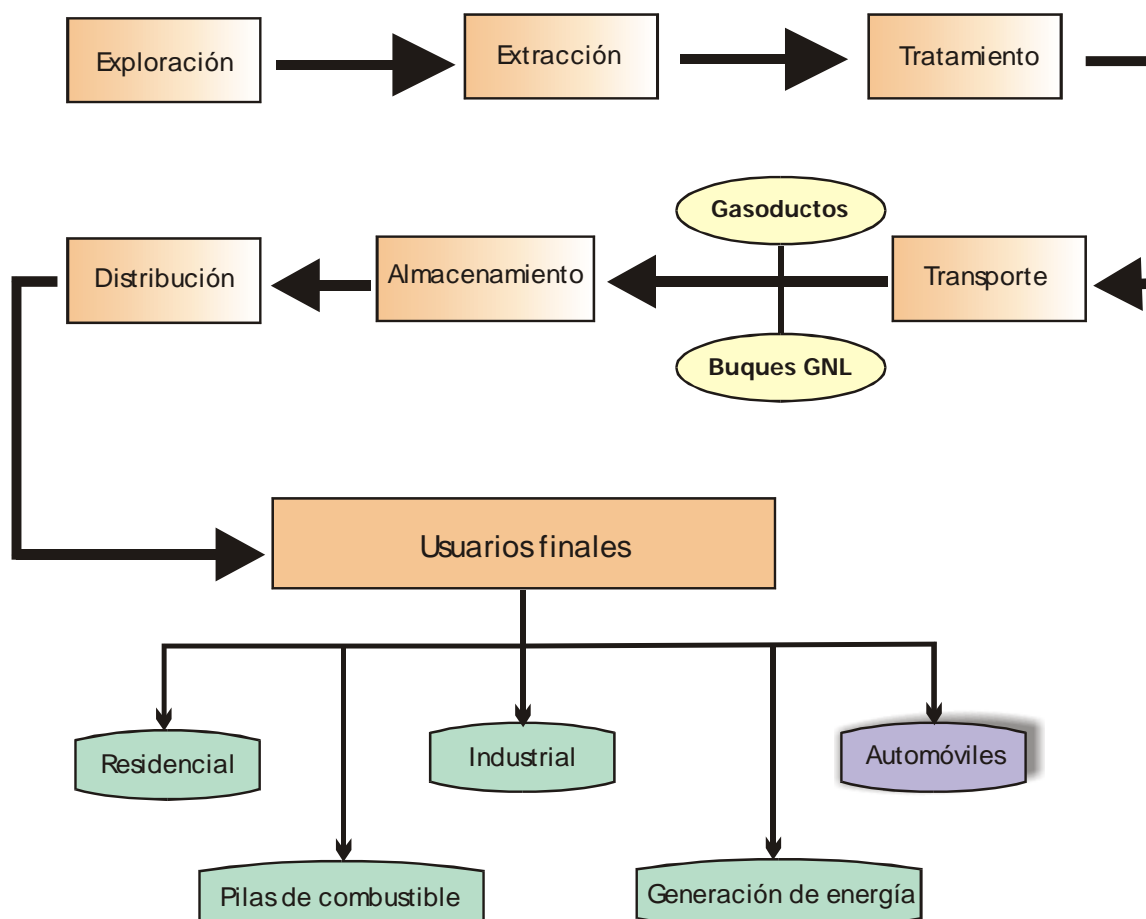


Fig. 6.7. Proceso de obtención del gas natural

Brevemente se describen las etapas anteriores:

a. Exploración:

Se considera una etapa muy importante dentro del proceso. En ésta los geólogos analizan la composición del suelo y la comparan con muestras de otras zonas donde se ha encontrado



gas natural con el fin de definir si se trata de una zona donde es posible encontrar gas natural. Posteriormente se llevan a cabo análisis específicos como el estudio de la formación de rocas a nivel del suelo donde se pudieron haber formado napas de gas natural.

b. Extracción:

El gas se extrae cavando un hueco en la roca. La perforación puede efectuarse en tierra o en mar. El equipamiento utilizado varía dependiendo de la napa del gas y de la naturaleza de la roca. En el caso de una perforación poco profunda se puede utilizar perforación de cable, y para prospecciones a mayor profundidad se utilizan plataformas de perforación rotativa (las más utilizadas en la actualidad).

Normalmente el gas natural está bajo presión y sale de un pozo sin intervención externa, sin embargo a veces es necesario utilizar bombas u otros métodos más complicados para obtener gas de la tierra.

c. Tratamiento:

El tratamiento del gas natural implica el reagrupamiento, acondicionamiento y refinado del gas natural bruto con el fin de transformarlo en energía útil para diferentes aplicaciones. Primero se hace una extracción de los elementos líquidos del gas natural y después de una separación entre los diferentes elementos que componen los líquidos.

Una vez finalizado el proceso de tratamiento de gas natural, éste se transporta por gasoductos o buques hasta la planta de depurado y transformación para ser conducido después hacia una red de gas o a las zonas de almacenamiento.

El proceso de transporte y almacenamiento se detalla en un apartado posterior.

#### **6.4.4. Propiedades**

El gas natural no es ni corrosivo ni tóxico, tiene una temperatura de combustión elevada, además de tener un estrecho intervalo inflamabilidad, lo que hace del gas natural un combustible fósil seguro, en comparación con otras fuentes de energía.

El GN en su estado natural no tiene ni olor ni color, es insípido, sin ninguna forma particular y es más ligero que el aire. Se presenta en forma gaseosa a una temperatura superior a los -161°C.



La densidad relativa del gas natural en promedio es de 0.60 (inferior a la del aire), por lo que hace que tenga tendencia a elevarse y pudiendo, consecuentemente, desaparecer fácilmente del sitio donde se encuentra por cualquier grieta.

#### **6.4.5. Transporte y almacenamiento**

Uno de los elementos necesarios para la utilización del gas natural en vehículos es la incorporación de depósitos y estaciones especiales de recarga de gas natural. El gas natural en automoción puede ser utilizado en forma de gas natural comprimido o de gas natural licuado:

- El gas natural comprimido (GNC) es una forma de almacenar el gas natural en vehículos que han de ser equipados en depósitos los cuales han de soportar presiones de 200 bares. La autonomía que se consigue es un poco inferior a los combustibles líquidos y se debe tener en cuenta el aumento de peso que suponen los cilindros donde va almacenado, normalmente en la parte trasera, en el chasis o en el techo del vehículo.

Las estaciones de carga están formadas por equipos de compresión además de unos aparatos suministradores o surtidores.

- El gas natural licuado (GNL) es una forma de almacenar el gas natural en vehículos que no requiere depósitos preparados para soportar altas presiones ya que la presión máxima es de 10 bares, pero si que necesitan aislamiento térmico para reducir la vaporización del GNL. De esta manera se consigue una autonomía más grande, ya que tiene una densidad superior que el GNC a 200 bar.

Para posibilitar el transporte, mediante buques metaneros, el gas sufre previamente un proceso de licuefacción para maximizar la masa de gas transportada en los buques metaneros, y posteriormente, ya en destino, se somete nuevamente a regasificación (cambio de fase líquido-gas). Estos procesos producen un aumento del consumo de energía global siendo esto causa de repercusión medioambiental.

El GNL tiene un almacenamiento criogénico y es a partir de estaciones satélites recargadas desde cisternas como se carga en el vehículo.

Si bien la densidad del GNL es mayor que la del GNC, el primero requiere de un sistema de venteo de gas a la atmósfera para compensar las pérdidas térmicas del sistema de almacenamiento.



#### **6.4.6. Características de aplicabilidad en MACI**

Los vehículos a gas natural utilizan un motor de combustión interna operado con ciclo Otto, pueden usar dos conceptos en relación con la mezcla gas / aire:

- Mezcla pobre. Considerada como cualquier relación de mezcla que tenga más aire del necesario. En este caso se utiliza un catalizador de oxidación.
- Mezcla estequiométrica, Este sistema consiste en introducir al motor la mezcla de gas y aire estrictamente necesaria para quemarla, de forma que no haya oxígeno residual en los gases de escape. Para ello se utiliza un catalizador de 3 vías.

El funcionamiento del vehículo a GN es muy simple, cuando el motor requiere gas natural, sale de los cilindros (donde está almacenado), pasa a través de una válvula de bloqueo manual y se traslada a través de un regulador de combustible. El gas natural se inyecta a presión atmosférica a través de un mezclador de gas natural donde se mezcla con aire, a partir de ahí fluye hacia la cámara de combustión siguiendo el procedimiento típico de un motor de ciclo Otto.

Actualmente existen en el mercado varias marcas que ofrecen Kits de conversión para motores de ciclo Otto de inyección electrónica, de esta forma los vehículos ligeros podrán circular tanto con gas natural como con gasolina. También hay fabricantes que fabrican los vehículos con motores de gas natural.

En el caso de vehículos pesados es más conveniente el uso exclusivo de motores de gas natural para así obtener resultados más óptimos.

Los motores no necesitan grandes modificaciones, además de los sistemas de conversión permiten reutilizar los equipos de gas natural en los nuevos vehículos al sustituir las unidades antiguas, ya que no modifica las características del motor.

Se emplea como combustible gracias a su gran poder calorífico, por tener una combustión fácilmente regulable y por ser limpia y escasa su producción de contaminación.

#### **6.4.7. Características medioambientales**

Es considerado el combustible natural más limpio, en términos de contaminación, de los combustibles fósiles. No contiene casi azufre y virtualmente no genera dióxidos de azufre (SO<sub>2</sub>). Sus emisiones de dióxido de carbono son más pequeñas que otros combustibles fósiles. Se considera que la producción de gas natural es mucho más ecológica que transportar y refinar el petróleo.



## 6.5. Hidrógeno

### 6.5.1. Definición

El hidrógeno es el primer elemento de la tabla periódica y uno de los constituyentes principales del agua y de toda la materia orgánica. Es el elemento químico más abundante en la tierra y en la atmósfera, lo que le confiere la propiedad de ser inagotable. También se caracteriza por ser un elemento de difícil obtención por no existir en la naturaleza en estado puro, pero a pesar de este hecho, es una opción prometedora como combustible alternativo.

### 6.5.2. Composición

El átomo de hidrogeno H, tiene número atómico 1 y peso atómico de 1,00797. En condiciones normales es un gas, compuesto por moléculas diatómicas,  $H_2$ .

Es el elemento químico más ligero, estando su isótopo más abundante constituido por único par protón-electrón. Se considera el elemento que es capaz de reaccionar con más elementos químicos, siendo el compuesto más abundante e importante del hidrogeno, el agua.

El hidrógeno tiene una electronegatividad intermedia (2,2) por lo que puede formar compuestos en los que sea el elemento con mayor o menor carácter metálico, siendo éstos desde compuestos binarios ( $NH_3$ ,  $H_2O$ ,  $H_2O_2$ ...) hasta gran cantidad de hidrocarburos y derivados.

*Contenidos medios de impurezas del Hidrógeno obtenido industrialmente (Tabla 6.4.)*



COMPONENTES	Límites máximos
Gases inertes (He + Ar + N <sub>2</sub> )	<1 %
Hidrocarburos totales (incluso aceite)	<1 ppm
Oxígeno	<500 ppm
CO + CO <sub>2</sub>	<2 ppm
Azufre total	<1 ppm
Amoníaco	<0,01 ppm
Agua (líquido)	<0,5 %
Contenido inorgánico	<5 µS
	<0,01 % cenizas

TABLA 6.4. Contenidos medios de impurezas del hidrógeno

### 6.5.3. Obtención y generación de hidrógeno

El principal inconveniente del uso de hidrógeno como combustible alternativo es su obtención. Al no ser un recurso, sino un portador de energía, el hidrógeno ha de producirse a partir de una materia prima como puede ser el agua o los recursos fósiles, y por lo tanto ha de consumirse una fuente primaria de energía antes de obtenerlo. Así, la generación de este elemento supone una inversión económica y técnica de gran envergadura.

Puede obtenerse a partir de diversas fuentes, ya sea nuclear, fósil o bien de tipo renovable, mediante los siguientes procesos:

- Electrólisis a partir del agua: es un proceso que disocia la molécula del agua en sus componentes primarios y de esa manera obtener hidrógeno y oxígeno. Es un proceso que requiere gran cantidad de energía.
- Gasificación de la biomasa
- A partir de hidrocarburos (gas natural, naftas) y alcoholes (metanol, etanol) los procesos son:



- Steam reforming
- Oxidación parcial
- Autothermal reforming

La forma de producir el Hidrógeno se puede realizar de 3 maneras:

1. Producción centralizada en grandes plantas ("off site")
2. Producción descentralizada o distribuida ("on site")
3. Producción a bordo de los vehículos ("on board")

La logística, por lo tanto, dependerá de la manera de producir este elemento. Con la 1ª opción el transporte se lleva a cabo por red o carretera y de forma licuada o comprimida. La producción distribuida utiliza la red de gas natural y oleoductos existentes actualmente. Y por último, la producción "on board" supone disponer de un reformador en el propio vehículo.

#### **6.5.4. Propiedades**

El hidrógeno, en condiciones normales de presión y temperatura, forma un gas diatómico inflamable, incoloro, inodoro e insípido, con un punto de ebullición de tan solo 252,88 °C y un punto de fusión de -259,13°C. A presión muy alta, tal y como se produce en el núcleo de las estrellas gigantes de gas, el hidrógeno se convierte en un líquido metálico, en cambio a muy baja presión tiende a existir en átomos individuales.

Se caracteriza por ser el combustible de mayor poder calorífico, lo que lo hace, en principio, un transportador de energía ideal.

Además, posee una velocidad de inflamación muy alta con amplios límites de inflamabilidad, lo cual es muy favorable para su uso como combustible en motores de combustión interna, turbinas de gas o motores a chorro.

Posee alta temperatura de ignición y baja luminosidad de llama lo que lo hace más atractivo en relación a otros combustibles, sobretodo para su aplicación militar (llama de emisión infrarroja).

En último lugar, se muestran las propiedades más características del hidrógeno, algunas ya detalladas con anterioridad.

- Estado : gas
- Estructura cristalina: hexagonal



- Color: incoloro
- Densidad: 0.0899 (kg/m<sup>3</sup>)
- Conductividad térmica: 0.1815W/(m·K)
- Calor específico: 14304 J/kg·K
- Punto de fusión: 14.025K
- Entalpía de fusión: 0.05868 kJ/mol
- Punto de ebullición: 20.268K
- Velocidad de llama: 3.24 a 4.4 m/s
- Rango de inflamabilidad: desde 4 a 75% en volumen
- Temperatura de autoignición: 520°C
- Temperaturas de llama: 2.050°C.

#### **6.5.5. Características de aplicabilidad en MACI**

Las características más destacables que hacen del hidrógeno una alternativa como combustible son su elevado poder calorífico y las emisiones que produce en su combustión. A partir de estas dos propiedades y analizadas las demás propiedades físico-químicas se estudia la adaptabilidad del hidrógeno en motores de combustión interna para utilizar en el sector automovilístico.

El hidrógeno es un combustible que se puede utilizar en motores de encendido provocado, es decir, en motores Otto. Su proceso combustión es el mismo que el de la gasolina o cualquier otro combustible utilizados en estos motores, pero existen diversos factores que hacen su aplicabilidad no sea la ideal.

Tal y como se ha visto en el punto anterior, el hidrógeno posee un estequiometría muy diferente a otros combustibles y eso dificulta su proceso de combustión en el motor.

A más de tener una alta velocidad de llama, inflamabilidad en amplios rangos, alta temperatura de autoignición y temperaturas de llama de 2.050°C. Aunque todo apunta a que es un gran carburante para el transporte, el problema fundamental reside en generar un sistema de almacenaje que satisfaga todos los requisitos de seguridad.





Además, al ser la velocidad de combustión laminar del gas con el hidrógeno 5 veces mayor que en el caso de la gasolina, y teniendo en cuenta la turbulencia, provoca que la flama pase rápidamente por los inyectores sin ser detenida causando una ignición previa, no deseada. Hecho que genera diversos problemas, entre otros, que se forme una película de aceite, una rotura del motor...En resumen, el asunto tiene sus ventajas y desventajas que sin duda serán resueltas en el futuro.

Para concluir se detallará un balance energético del hidrógeno, en el cual se puede observar que al contrario de los combustibles fósiles que tienen un ratio infinito gracias a que se encuentran a disposición en nuestro planeta, el hidrógeno necesita energía para generarse.

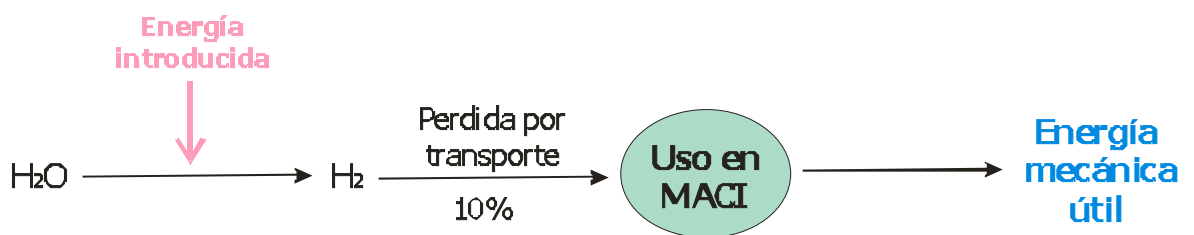


Fig. 6.8. Proceso de transformación de energía usando  $H_2$  en MACI

Por lo tanto el ratio para el hidrógeno es la energía mecánica útil entre la energía introducida para generarlo, siendo éste un valor finito.



#### **6.5.6. Características medioambientales**

El hidrogeno se caracteriza por ser un combustible limpio, ya que según se produzca la combustión emite:

- vapor de agua, al combinarse con el oxígeno utilizado en la combustión.
- óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), si la combustión se produce mediante aire, ya que éste contiene una proporción de este elemento.

Por lo tanto la formación de  $\text{NO}_x$  es el único contaminante producido.

El uso del hidrógeno como combustible se traduce desde el punto de vista medioambiental en la reducción de las emisiones de HC,  $\text{CO}_2$ , óxidos de nitrógeno y azufre.

A pesar de considerar al hidrógeno como un combustible limpio en el uso en motores MACI, tal y como se ha explicado, hoy por hoy según el proceso de obtención del hidrógeno se producen emisiones medioambientales.



## 7. Estudio comparativo entre los combustibles

El estudio comparativo realizado es la interconexión de los datos obtenidos y calculados de cada uno de los combustibles analizados a lo largo del estudio. En primer lugar se presentan unas tablas resumen de las características de los carburantes a partir de las cuales se desarrolla la comparación. A continuación se divide el estudio comparativo según el análisis, bien sea a nivel energético o de interacción con el medio.

Cabe destacar que a pesar de disponer de datos significativamente comparables no se puede establecer una comparación absoluta de si un combustible es mejor o peor que otro. El análisis completo depende además de otros factores externos a la extensión que abarca el presente proyecto.

### 7.1. Tabla de propiedades y características

A continuación se recogen los datos obtenidos de todos los combustibles analizados en unas tablas resumen que permiten comparar sus cualidades más características. Las consideraciones tomadas a la hora de calcular las propiedades son las siguientes:

	motor	
	Ciclo Otto	Ciclo Diesel
rendimiento MACI automoción	0,23-0,28	0,27-0,35

TABLA 7.1. Rangos considerados de los rendimientos de los motores en automoción

densidad del aire en cond amb	1,1847 kg/m <sup>3</sup>
densidad del agua	1000 kg/m <sup>3</sup>

TABLA 7.2. Densidades del aire y el agua consideradas

(\*) Indican valores aproximados

Excepto en el caso que se indique lo contrario las propiedades se calculan en condiciones ambientales.



propiedades	unidades	COMBUSTIBLES	
		GASOLINA	GASOIL
Motor de ciclo	-	Otto	Diesel
Composición química	-	$C_{7,18}H_{13,1}O_{0,1}$	$C_{13,15}H_{24,8}$
Masa molar	kg/mol	0,0992	0,1824
Estado	-	líquido	líquido
Poder calorífico inferior	MJ/kg-MJ/m <sup>3</sup>	43,53-32020	42,69-35581
	kcal/kg-kcal/m <sup>3</sup>	10398,95-7649307,21	10198,28-8500000
	Temias/kg-Temias/m <sup>3</sup>	10,40-7649,31	10,20-8500
Densidad	kg/m <sup>3</sup>	705-770	840-890
Densidad relativa	-	0,705-0,770	0,84-0,89
Número de Metano	-	25-40	-
Número de Octano	-	90-100	-
Número de Cetano	-	-	40-60
Viscosidad (40°C)	cSt	-	3,2
Temperatura de autoignición	°C	500	200-400
Punto de ebullición	°C	30-205	180-370
Curva de destilación	°C	30-205	180-370
Dosado estequiométrico mas.	kg aire/ kg comb	14,19	14,62
Dosado estequiométrico vol.	m <sup>3</sup> aire/m <sup>3</sup> comb	8863,510	10674,686
Densidad mezcla comb/aire	kg/m <sup>3</sup>	1,268	1,266
Límites de inflamabilidad	% (vol)	1-7,6	0,7-5
PCI mezcla comb/aire	MJ/kg	2,86	2,73
Consumo específico habitual inferior	g/kwh	295,95	241,21
Consumo específico habitual superior	g/kwh	360,29	312,68
Emissiones CO <sub>2</sub> (teóricas)	g/kwh	271,87	270,74
Adaptaciones del motor	sí/no	-	-

TABLA 7.3. Propiedades físico-químicas de gasolina y gasoil



propiedades	unidades	COMBUSTIBLES			
		BIOGÁS	BIOCARBURANTES		
			Biodiesel	Alcoholes	Metanol
Motor de ciclo	-	Otto	Diesel	Otto	Otto
Composición química	-	$0,55\text{CH}_4+0,4\text{CO}_2+\text{otros}$	$\text{C}_{18,7}\text{H}_{34,9}\text{O}_2$	$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$	$\text{CH}_4\text{O}$
Masa molar	kg/mol	0,0264 (*)	0,291	0,046	0,032
Estado	-	gas	líquido	líquido	líquido
Poder calorífico inferior	MJ/kg-MJ/m <sup>3</sup>	15,33-18,86	37,30-33103	26,80-21285	19,94-15870
	kcal/kg-kcal/m <sup>3</sup>	3662,21-4505,49	8910,65-7914476,83	6402,29-5084806,50	4763,50-3791208,79
	Termias/kg-Termias/m <sup>3</sup>	3,66-4,51	8,91-7914,48	6,40-5084,81	4,76-3791,21
Densidad	kg/m <sup>3</sup>	1,23	875-900	794	796
Densidad relativa	-	0,953	0,875-0,900	0,794	0,796
Número de Metano	-	133,3	-	70	70
Número de Octano	-	162,53	-	120	120
Número de Cetano	-	-	47-56	-	-
Viscosidad (40°C)	cSt	-	3,5-4,5	-	-
Temperatura de autoignición	°C	700	>100	423,8	470
Punto de ebullición	°C	/	/	78,3	64,7
Curva de destilación	°C	/	72-360	-	-
Dosado estequiométrico mas.	kg aire/ kg comb	5,56	12,53	9,02	6,48
Dosado estequiométrico vol.	m <sup>3</sup> aire/m <sup>3</sup> comb	5,773	9386,659	6045,311	4353,912
Densidad mezcla comb/aire	kg/m <sup>3</sup>	1,191	1,279	1,316	1,367
Límites de inflamabilidad	% (vol)	/	/	4,3-19	6,7-36
PCI mezcla comb/aire	MJ/kg	2,34	2,76	2,67	2,66
Consumo específico habitual im	g/kwh	837,58	275,44	480,58	646,19
Consumo específico habitual su	g/kwh	1019,66	367,05	585,05	786,67
Emissiones CO <sub>2</sub> (teóricas)	g/kwh	189,11	272,97	257,4	248,76
Adaptaciones del motor	sí/no	sí	no	sí	sí

TABLA 7.4. Propiedades físico-químicas del biogás y biocarburantes



propiedades	unidades	COMBUSTIBLES					
		GLP					
		Propano		Butano		Butano40 -Propano60	
Motor de ciclo	-	Otto		Otto		Otto	
Composición química	-	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>		C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>		0,4C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> +0,6C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	
Masa molar	kg/mol	0,044		0,058		0,0496	
Estado	-	licuado	gas	licuado	gas	licuado	gas
Poder calorífico inferior	MJ/kg-MJ/m <sup>3</sup>	46,38-93,68		45,71-122,79		45,99-105,32	
	kcal/kg-kcal/m <sup>3</sup>	11079,79-22379,36		10919,73-29333,49		10986,62-25160,06	
	Termias/kg-Termias/m <sup>3</sup>	11,08-22,38		10,92-29,33		10,99-25,16	
Densidad	kg/m <sup>3</sup>	510	2,02	580	2,68	540	2,28
Densidad relativa	-	0,51	1,56	0,58	2,08	0,54	1,77
Número de Metano	-	32		52		40	
Número de Octano	-	95		108		100	
Número de Cetano	-	-		-		-	
Viscosidad (40°C)	cSt	-		-		-	
Temperatura de autoignición	°C	480		420		493	
Punto de ebullición	°C	-42		-6,2		-17	
Curva de destilación	°C	-		-		-	
Dosado estequiométrico mas.	kg aire/ kg comb	15,72		15,5		15,63	
Dosado estequiométrico vol.	m <sup>3</sup> aire/m <sup>3</sup> comb	6767,283	26,804	7588,419	35,0637292	7124,335	30,081
Densidad mezcla comb/aire	kg/m <sup>3</sup>	1,26	1,215	1,261	1,226	1,26	1,22
Límites de inflamabilidad	% (vol)	2,37-9,50		1,83-8,42		2,15-9,06	
PCI mezcla comb/aire	MJ/kg	2,77		2,77		2,77	
Consumo específico habitual inferior	g/kwh	277,61		281,31		279,11	
Consumo específico habitual superior	g/kwh	337,95		342,46		339,78	
Emisiones CO <sub>2</sub> (teóricas)	g/kwh	233,17		239		235,98	
Adaptaciones del motor	sí/no	sí		sí		sí	

TABLA 7.5. Propiedades físico-químicas del propano, butano, butano40%-propano60%

propiedades	unidades	COMBUSTIBLES					
		GAS NATURAL			HIDRÓGENO		
Motor de ciclo	-	Otto			Otto		
Composición química	-	$0,9CH_4 + otros$			$H_2$		
Masa molar	kg/mol	0,016(*)			0,002		
Estado	-	licuado	comprimido a 200 bar	gas	licuado	comprimido a 200 bar	gas
Poder calorífico inferior	MJ/kg-MJ/m <sup>3</sup>	48,71-33,61			119,88-10,76		
	kcal/kg-kcal/m <sup>3</sup>	11636,41-8040,67			28638,32-2570,47		
	Temias/kg-Termias/m <sup>3</sup>	11,64-8,04			28,64-2,57		
Densidad	kg/m <sup>3</sup>	450	154	0,69	70,8	13,46	0,089
Densidad relativa	-	0,45	119,1	0,6	0,0708	10,41	0,069
Número de Metano	-	85			0		
Número de Octano	-	130			73		
Número de Cetano	-	-			-		
Viscosidad (40°C)	cSt	-			-		
Temperatura de autoignición	°C	560-580			570		
Punto de ebullición	°C	-162			-252,7		
Curva de destilación	°C	-			-		
Dosado estequiométrico mas.	kg aire/ kg comb	16,23			34,58		
Dosado estequiométrico vol.	m <sup>3</sup> aire/m <sup>3</sup> comb	6164,852	2109,749	9,453	2066,569	392,882	2,598
Densidad mezcla comb/aire	kg/m <sup>3</sup>	1,257	1,257	1,137	1,218	1,216	0,88
Límites de inflamabilidad	% (vol)	4,5-15,1			4,0-75,0		
PCI mezcla comb/aire	MJ/kg	2,82			3,37		
Consumo específico habitual inferior	g/kwh	264,61			107,23		
Consumo específico habitual superior	g/kwh	322,14			130,54		
Emissiones CO <sub>2</sub> (teóricas)	g/kwh	174,27			0		
Adaptaciones del motor	sí/no	sí			sí		

TABLA 7.6. Propiedades físico-químicas del gas natural y hidrógeno



## 7.2. Características y prestaciones energéticas

El estudio se basará en una comparativa de las propiedades de los combustibles alternativos, principalmente, respecto a la gasolina y al gasoil, y en consecuencia se analizarán cual de ellos puede ser la mejor opción entre ellos. Los factores que determinan el análisis son:

- Capacidad de almacenaje
- Calidad de la mezcla
- Contenido energético
- Características de combustión

Para facilitar la comparativa se evaluarán gráficamente las propiedades más significativas.

### A. DENSIDAD

La densidad determina la cantidad de materia contenida en un volumen determinado y da una idea del contenido en energía que posee el combustible. Mayores densidades indican más energía almacenada por unidad de volumen, factor que junto con el consumo específico, afecta directamente a la autonomía del vehículo.

Observando los gráficos de las densidades en los diferentes estados de agregación, mostrados en las Figuras 7.1, 7.2 y 7.3, automáticamente se deduce la necesidad de almacenar los combustibles en el vehículo en forma líquida para conseguir una mayor autonomía.





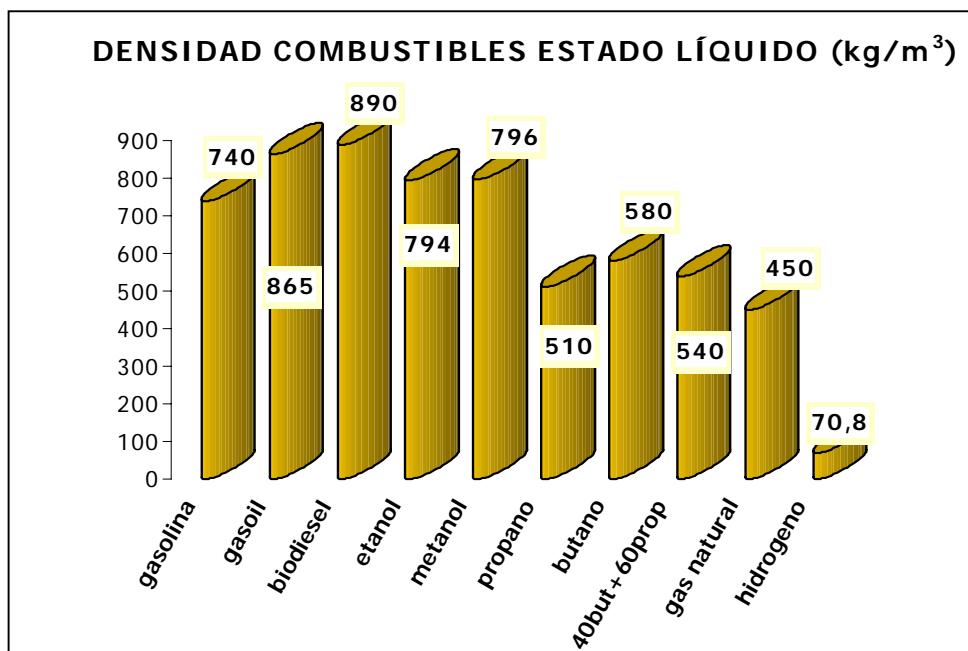


Fig. 7.1. Densidades de los combustibles en estado líquido

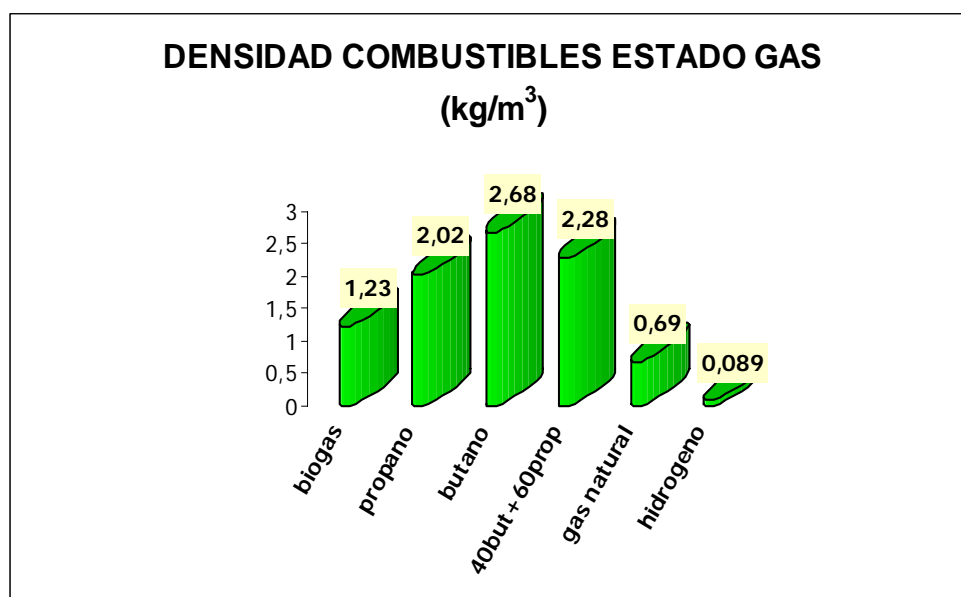


Fig. 7.2. Densidades de los combustibles en estado gaseoso



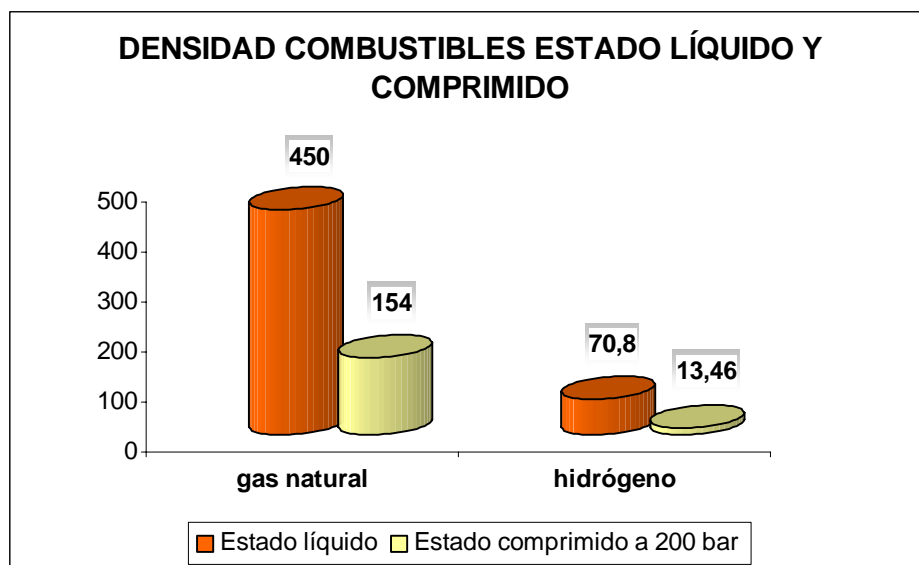


Fig. 7.3. Densidad en estado líquido y comprimido (a 200 bar) del GN y del hidrógeno

El biodiesel es el combustible que mayor capacidad de almacenamiento permite. Para convertir el biogás en una alternativa factible en la automoción en primer lugar debe tratarse en estado comprimido o licuado al igual que el gas natural para elevar el contenido energético por unidad de volumen. Si el gas natural se utiliza en estado comprimido su densidad es aproximadamente 5 veces inferior a la de la gasolina, esto implica un aumento de peso del tanque y por lo tanto es más apropiado para grandes flotas de vehículos. El GNL posee una densidad relativamente elevada, los inconvenientes se presentan a la hora de licuar el gas porque se realiza a bajas temperaturas ( $\approx -160$  °C), y a la hora de almacenarlo. Estos procesos producen un aumento del consumo de energía global siendo esto causa de repercusión medioambiental

El hidrógeno se comporta de una manera similar al GN pero con una densidad muy inferior. Este hecho produce un aumento del volumen del almacenamiento y con ello un aumento del peso del vehículo. La complejidad técnica del almacenamiento del hidrógeno en forma licuada es uno de los factores desacelerantes en el avance de su consolidación como combustible alternativo. Para almacenarlo en este estado se necesitan depósitos criogénicos de elevado desarrollo tecnológico y coste.



## B. CONTENIDO ENERGÉTICO

El poder calorífico de un combustible es la cantidad de calor desprendido por el mismo en su combustión teórica y completa, en condiciones normales. A partir de su análisis se puede comparar el contenido energético entre los diferentes combustibles.

En referencia al contenido energético de los combustibles, cabe destacar que poseen una capacidad energética individual muy variable. El combustible que contiene menor PCI másico es el biogás con 15,33 MJ/kg, siendo 2,84 veces menor que el contenido energético de la gasolina. Por el contrario el hidrógeno es el combustible con mayor PCI másico, 2,75 veces mayor que el contenido energético de la gasolina. El metanol, el etanol y el biodiesel, tal y como se puede visualizar, presentan un bajo poder calorífico en relación a los hidrocarburos que forman la gasolina y el gasoil, esto es debido a la presencia de oxígeno en su formulación. Por lo tanto el combustible más adecuado energéticamente sería el hidrógeno.

Pero, a pesar de los valores que se muestran en la gráfica de la Figura 7.4. la evaluación correcta del contenido energético en el proceso de combustión de los motores MACI, es a partir del parámetro característico: PCI de la mezcla.

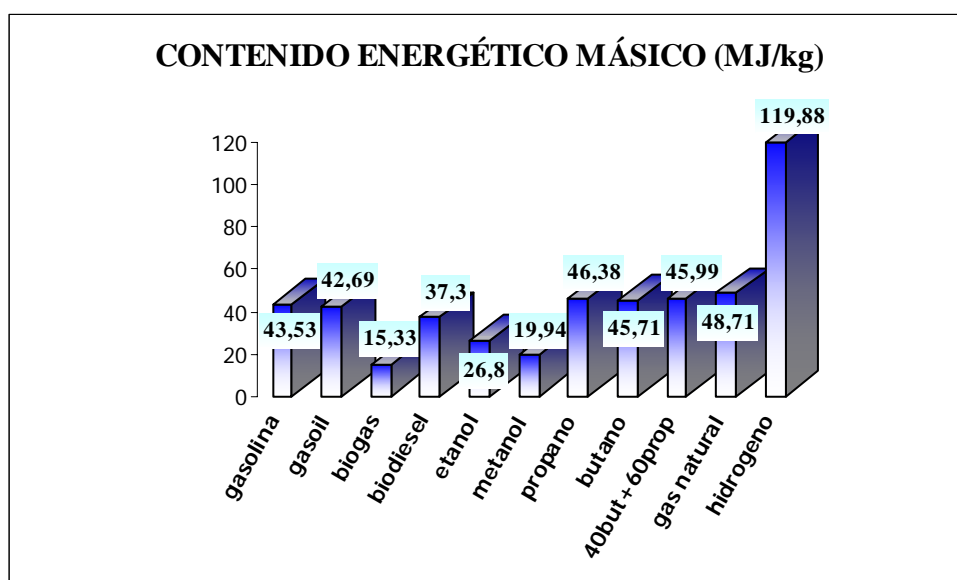


Fig. 7.4. Contenido energético másico (PCI) de todos combustibles



Contrariamente, como puede observarse en la gráfica de la Figura 7.5, el contenido energético de la mezcla de los combustibles con aire no presentan diferencias significativas con respecto a la gasolina y al gasoil, estando los valores entre 2,66 y 3,15 MJ/kg. Siendo los ejemplos más claros: el biogás y el hidrógeno. Ya que a nivel individual, como se ha explicado con anterioridad, el biogás suponía una disminución de 2,84 veces respecto a la gasolina, en cambio, teniendo en cuenta la mezcla con aire la relación aumenta hasta 1,22 veces. En el caso del hidrógeno la relación disminuye de 2,75 a 1,8. Por lo tanto, para concluir habría que destacar que a nivel energético el gasoil y el biodiesel se mantienen igual y entre los combustibles alternativos a la gasolina el de mayor contenido energético es el hidrógeno, seguidamente el gas natural y el resto tienen un PCI de mezcla muy similar a la gasolina.

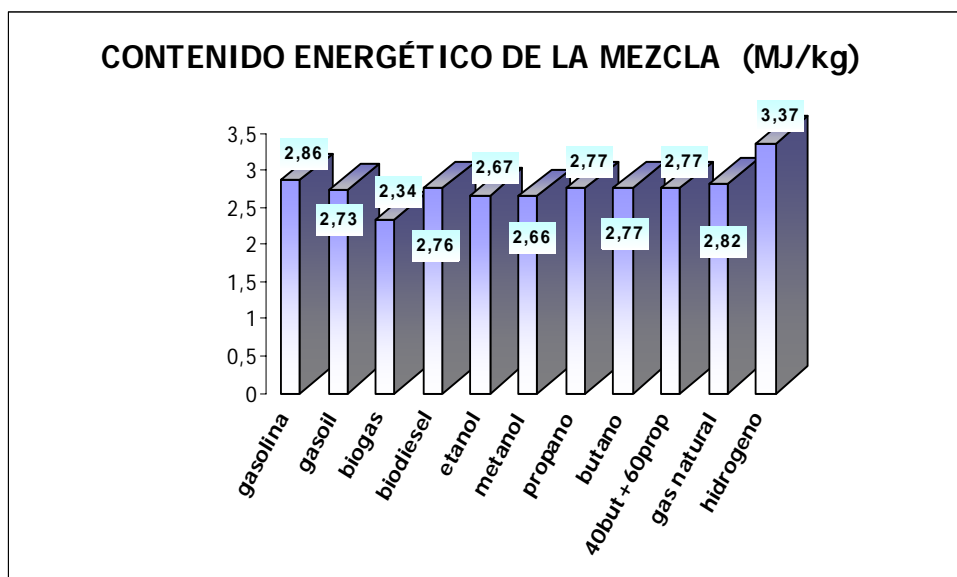


Fig. 7.5. Contenido energético másico (PCI) de todos combustibles

### C. DOSADO ESTEQUIOMÉTRICO

El dosado estequiométrico es la relación entre la cantidad de aire y la de combustible necesario para que se produzca una combustión completa, sin que falte ni sobre comburente.

A partir de los datos que se visualizan en la gráfica de la Figura 7.6, se puede hacer un análisis del caudal de los combustibles alternativos respecto a los tradicionales (gasolina y



gasoil) que se necesita para obtener una mezcla de igual riqueza. Para su comparación se utiliza la siguiente relación:

$$\frac{\text{dosado gasolina}}{\text{dosado combustible de Ciclo Otto}} ; \frac{\text{dosado gasoil}}{\text{dosado combustible de Ciclo Diesel}}$$

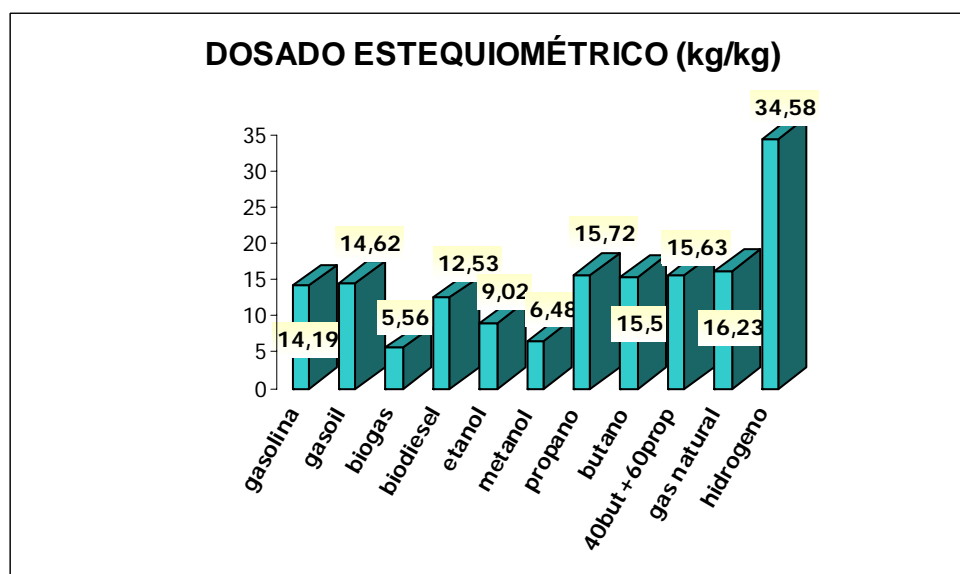


Fig. 7.6. Dosado estequiométrico de los combustibles

En la Tabla 7.7 se muestra la relación de caudal de cada combustible, por ejemplo, para obtener una mezcla de igual riqueza con respecto a la gasolina se necesita 2,55 veces más de caudal de biogás, en el caso del propano se necesitaría 0,9 veces más de caudal, por lo tanto 1,1 veces menos de caudal de propano. Los combustibles que poseen una relación mayor que la unidad necesitarán un aumento de los conductos correspondientes del motor.



		DOSADO	RELACIÓN CAUDAL	MODIFICACIÓN CONDUCTOS
CICLO OTTO	Biogás	5,56	2,55	SI
	Etanol	9,02	1,6	SI
	Metanol	6,48	2,2	SI
	Propano	15,72	0,9	NO
	Butano	15,5	0,91	NO
	40But+60Prop	15,63	0,91	NO
	Gas natural	16,23	0,87	NO
	Hidrogeno	34,58	0,41	NO
CICLO DIESEL	Biodiesel	12,53	1,2	SI

TABLA 7.7. Relaciones de caudal de los combustibles alternativos respecto a la gasolina y gasoil

A partir de las relaciones de caudal obtenidas se deduce la disminución del caudal necesario para realizar una combustión estequiométrica del hidrógeno. En relación con la gasolina, a excepción del biogás y de los alcoholes, todos se mantienen con un caudal similar e incluso mejor. En el caso del ciclo diesel, se necesita mayor caudal de biodiesel para obtener la misma riqueza que utilizando gasoil.

#### D. CONSUMO ESPECÍFICO

A continuación se evalúa de manera aproximada la autonomía de un vehículo que funcionase con los combustibles analizados. Se ha calculado la capacidad en litros que debería tener un tanque de combustible para obtener una energía final de 1 kWh, mediante un sencillo cálculo a partir del consumo específico y la densidad de los carburantes.

La Figura 7.7 muestra los límites inferior y superior de consumo específico para todos los combustibles considerados teniendo en cuenta el rango de valores de rendimiento para motores que realizan ciclo Otto y Diesel.

$$\eta_{\text{Ciclo Otto}} = 0,23 \div 0,27$$

$$\eta_{\text{Ciclo Diesel}} = 0,27 \div 0,35$$



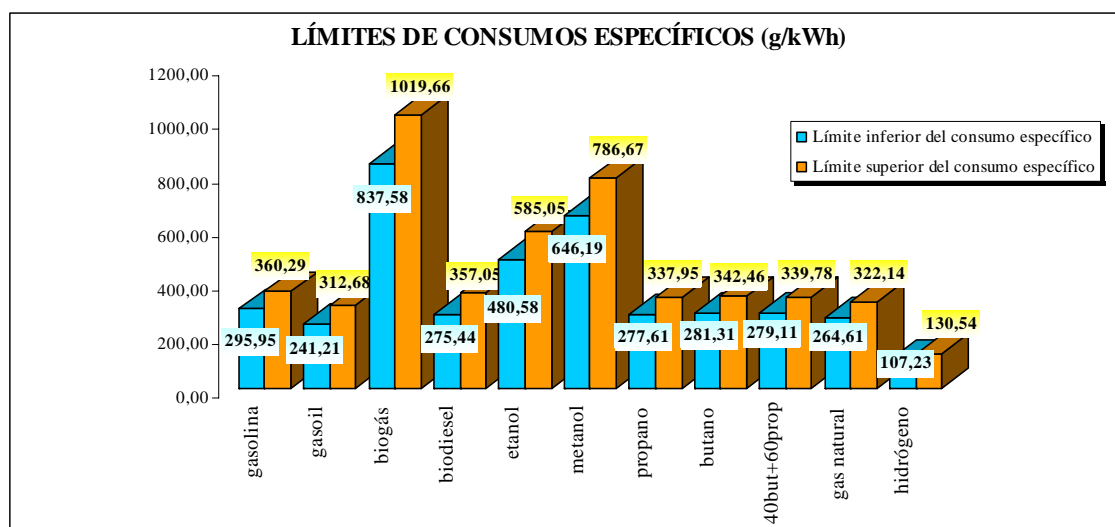


Fig. 7.7. Límites inferior y superior del consumo específico teórico para cada combustible

Como se observa claramente en la Tabla 7.8 se confirma la necesidad de almacenar el biogás de forma comprimida o licuada para convertirlo en combustible alternativo. En comparación con la gasolina y el gasoil todos los combustibles presentarían una autonomía inferior. Dentro de los alcoholes, el metanol necesitaría un depósito de doble capacidad de almacenamiento que uno que contuviese gasolina. Los gases licuados del petróleo necesitan un mayor volumen de almacenamiento respecto a la gasolina pero menor respecto a los demás combustibles alternativos.

El hidrógeno destaca por su drástica disminución de autonomía teórica debido a su baja densidad en estado licuado. El combustible alternativo más competitivo respecto a los tradicionales en función de la autonomía sería el biodiesel, con un volumen de 0,36 l para obtener 1 kWh de energía respecto a los 0,32 que presenta el gasoil.



COMBUSTIBLE	Consumo específico medio (g/kWh)	Volumen / kWh	Estado del combustible
Gasolina	328,12	0,44	líquido
Gasoil	276,95	0,32	líquido
Biogás	928,62	754,97	gas
Biodiesel	316,25	0,36	líquido
Etanol	532,81	0,67	líquido
Metanol	716,43	0,9	líquido
Propano	307,78	0,6	licuado
Butano	311,88	0,54	licuado
40But+60Prop	309,44	0,57	licuado
Gas natural	293,08	0,65	licuado
Hidrógeno	118,88	1,68	licuado

TABLA 7.7. Relaciones de caudal de los combustibles alternativos respecto a la gasolina y gasoil

## E. NÚMERO DE OCTANO Y METANO

El número de octano indica la resistencia a la detonación de los combustibles que se utilizan en motores de ciclo Otto, cuanto mayor es este índice más controlada está la combustión de la mezcla y menos posibilidades hay de producirse autoignición en el cilindro. El número de octano está relacionado con la relación de compresión. La relación de compresión es la relación que existe entre el volumen de la cámara de combustión y el volumen del cilindro más la suma del volumen de la propia cámara (a mayor relación de compresión se necesitará un mayor índice de octano). Por lo tanto si se tiene en cuenta que los motores de encendido provocado tienen limitada su relación de compresión (8,5 a 1/10,5 a 1) debido a la tendencia a la detonación de los combustibles un mayor número de octano aumenta el rendimiento. Cabe destacar que si se utiliza un combustible con un NO menor al adecuado (según la relación de compresión del motor en el que se utilice) se produce la detonación o pre-encendido de la mezcla. Este fenómeno provoca una expansión brusca y descontrolada de la mezcla reduciendo así la eficiencia del motor.





Como se observa en la Figura 7.8 el combustible más destacable es el biogás. Su índice de octano es el más elevado debido a la gran proporción de  $\text{CO}_2$  que contiene en su composición ya que este elemento es inerte y no arde. Al contrario que el biogás, el hidrógeno es un elemento fuertemente detonante y esta propiedad incide en la peligrosidad de su utilización. Los alcoholes poseen un NO superior al que tiene la gasolina, en este sentido el uso de alcoholes en motores MEP mejoraría el rendimiento.

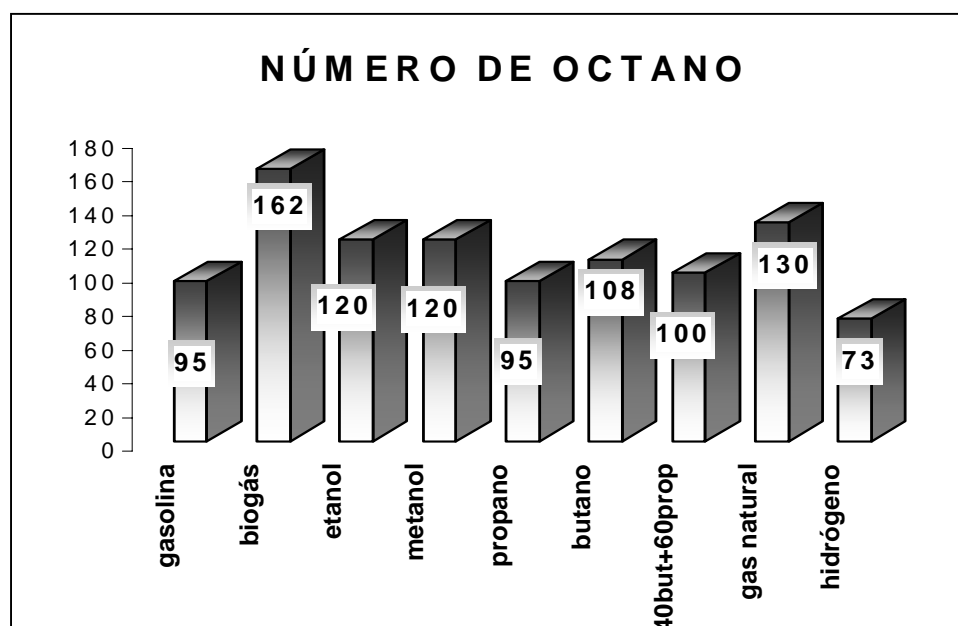


Fig. 7.8. Número de octano de los combustibles que se utilizan en motores de ciclo Otto

Para los combustibles que se utilizan en motores de ciclo Diesel una de las propiedades que determina un buen funcionamiento del motor es el número de cetano. Es un valor que permite evaluar el retardo de la ignición y ha de ser como mínimo de 40, cuanto mayor es el número de cetano, menor será el retardo. Como se puede observar en la Figura 7.9 el biodiesel y el gasoil tienen unos índices aproximados. Cuanto mayor sea este valor menos ruidosa será la combustión, además, al ser más controlada, se produce un aumento en la eficiencia y la potencia final. Un elevado número de cetano permite un mejor arranque en frío y un calentamiento más rápido.



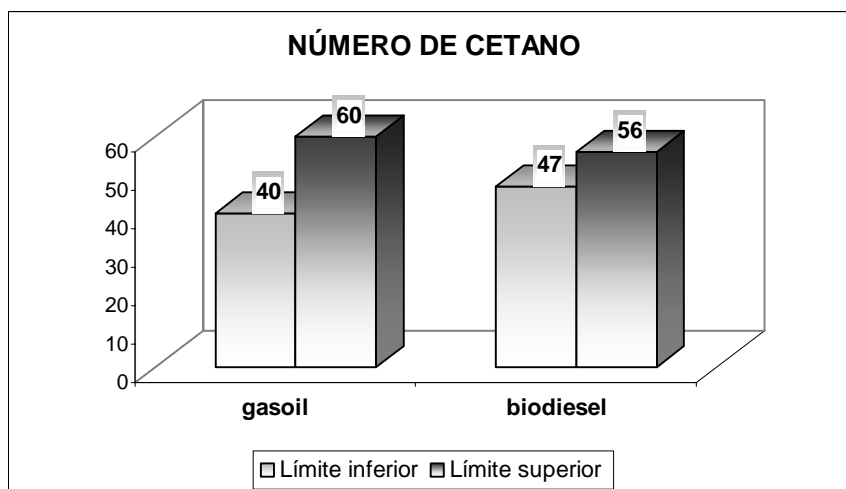


Fig. 7.9. Número de cetano de los combustibles que se utilizan en motores de ciclo Diesel

## F. LÍMITES DE INFLAMABILIDAD

Los límites de inflamabilidad afectan a la seguridad del uso de los combustibles, indican la proporción de volumen de combustible en una mezcla de aire en la que son capaces de arder. Como muestra la Figura 7.10 es difícil que no se produzca detonación en una mezcla de aire con hidrógeno debido al amplio rango en sus límites de inflamabilidad. Este hecho hace que el hidrógeno requiera de una seguridad y control exhaustivos en su operación. El metanol destaca también por su gran rango de inflamabilidad. En cambio los demás combustibles requieren una mezcla con aire más precisa, ya que sus límites de inflamabilidad poseen un rango más estrecho. El gasoil posee un rango muy estrecho, necesita más cantidad de aire para poder arder.



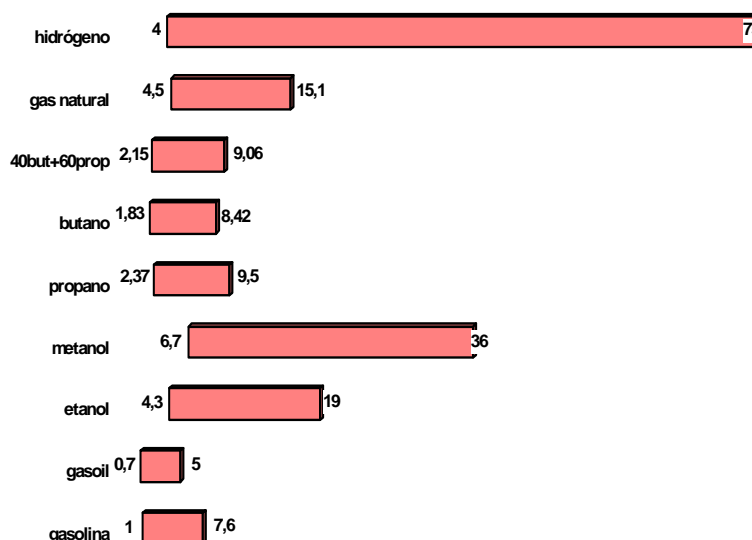


Fig. 7.10. Límites de inflamabilidad de algunos de los combustibles analizados

### 7.3. Emisiones contaminantes

El impacto ambiental de los motores alternativos de combustión interna es uno de los factores influyentes en el desarrollo de nuevas tecnologías destinadas a reducir las emisiones contaminantes y en la aplicación de combustibles alternativos de carácter ecológico con el mismo fin.

La generación de gases contaminantes es inherente a todo proceso de combustión pero además, las características del ciclo empleado en el motor y las propiedades físico-químicas del combustible influyen directamente en las emisiones que se producen durante el funcionamiento de este tipo de máquina térmica. Las sustancias contaminantes más significativas se especifican a continuación:

- Dióxido de Carbono  $\text{CO}_2$
- Monóxido de Carbono  $\text{CO}$
- Hidrocarburos  $\text{HC}$
- Óxidos de Nitrógeno  $\text{NO}_x$
- Partículas



En primer lugar se analizan las emisiones de  $\text{CO}_2$  de forma individual debido a que se producen en la combustión de sustancias que contienen carbono, y en segundo lugar se analizan las emisiones de  $\text{CO}$ ,  $\text{HC}$ ,  $\text{NO}_x$  y partículas que dependen de múltiples factores que no forman parte del presente estudio.

### 7.3.1. $\text{CO}_2$

En todo proceso de combustión se produce  $\text{CO}_2$ . El Dióxido de Carbono es un gas incoloro, inodoro y de sabor agrio que tiende a depositarse en las zonas bajas por ser más pesado que el aire. Tiene una densidad de  $1,98 \text{ kg/m}^3$  y al ser un gas no combustible posee un poder antidetonante muy elevado. No es un gas tóxico, pero al reducir la proporción de oxígeno en el aire se convierte en un elemento perjudicial para la salud, además es el principal responsable del efecto invernadero por la cantidad que se genera participando directamente en el cambio climático del planeta.

A partir de la reacción de combustión se conoce la cantidad estequiométrica de  $\text{CO}_2$  que se produce al quemar el combustible con el oxígeno contenido en el aire. Con estos datos, el dosado estequiométrico y el PCI de la mezcla de aire y combustible se deduce la masa de  $\text{CO}_2$  teórica emitida por unidad de energía producida. Poder cuantificar la emisión de este gas es la razón por la que se analiza independientemente del resto de contaminantes.

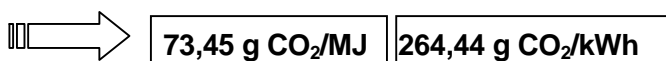
#### Gasolina

1.- Composición:  $\text{C}_{7,18}\text{H}_{12,1}\text{O}_{0,06}$

A partir de la combustión de un mol de este tipo de gasolina se obtienen 7,18 mol de  $\text{CO}_2$ .

Dosado estequiométrico: 14,19 kg/kg

PCImezcla: 2,86 MJ/kg



#### Gasoil

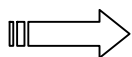
1.- Composición:  $\text{C}_{13,15}\text{H}_{24,6}$

A partir de la combustión de un mol de este tipo de gasoil se obtienen 13,15 mol de  $\text{CO}_2$ .

Dosado estequiométrico: 14,62 kg/kg

PCImezcla: 2,73 MJ/kg





74,39 g CO<sub>2</sub>/MJ

267,80 g CO<sub>2</sub>/kWh

### Biogás

Composición: 55% CH<sub>4</sub> + 40% CO<sub>2</sub> + otros

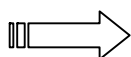
Para cuantificar las emisiones de este gas hay que tener en cuenta que el biogás contiene una proporción de CO<sub>2</sub> en su composición.

A partir de la combustión de un mol de metano (55% vol.) se obtiene 1 mol de CO<sub>2</sub>.

Dosado estequiométrico: 5,56 kg/kg

PCImezcla: 2,34 MJ/kg

La cantidad de CO<sub>2</sub> producida en la combustión es



52,53 g CO<sub>2</sub>/MJ

189,11 g CO<sub>2</sub>/kWh

La cantidad de CO<sub>2</sub> contenida en el biogás al quemar 1 mol de CH<sub>4</sub> es de 38,21 g CO<sub>2</sub>/MJ o 137,53 g CO<sub>2</sub>/kWh.

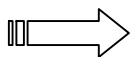
### Biodiesel

1.- Composición: C<sub>18,7</sub>H<sub>35</sub>O<sub>2</sub>

A partir de la combustión de un mol de este tipo de biodiesel se obtienen 18,7 mol de CO<sub>2</sub>.

Dosado estequiométrico: 12,53 kg/kg

PCImezcla: 2,76 MJ/kg



75,72 g CO<sub>2</sub>/MJ

272,58 g CO<sub>2</sub>/kWh

### Etanol

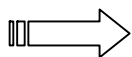
Composición: C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O

A partir de la combustión de un mol de etanol se obtienen 2 mol de CO<sub>2</sub>.

Dosado estequiométrico: 9,02 kg/kg

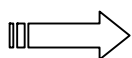
PCImezcla: 2,67 MJ/kg



**71,51 g CO<sub>2</sub>/MJ****257,42 g CO<sub>2</sub>/kWh****Metanol**Composición: CH<sub>4</sub>OA partir de la combustión de un mol de metanol se obtiene 1 mol de CO<sub>2</sub>.

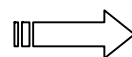
Dosado estequiométrico: 6,48 kg/kg

PCImezcla: 2,66 MJ/kg

**69,11 g CO<sub>2</sub>/MJ****248,78 g CO<sub>2</sub>/kWh****Propano**Composición: C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>A partir de la combustión de un mol de propano se obtienen 3 mol de CO<sub>2</sub>.

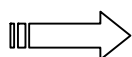
Dosado estequiométrico: 15,72 kg/kg

PCImezcla: 2,77 MJ/kg

**64,77 g CO<sub>2</sub>/MJ****233,19g CO<sub>2</sub>/kWh****Butano**Composición: C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>A partir de la combustión de un mol de butano se obtiene 4 mol de CO<sub>2</sub>.

Dosado estequiométrico: 15,50 kg/kg

PCImezcla: 2,77 MJ/kg

**66,39 g CO<sub>2</sub>/MJ****239,01 g CO<sub>2</sub>/kWh****Mezcla 40Butano-60Propano**Composición: 0,4C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> + 0,6C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>A partir de la combustión de un mol de mezcla se obtiene 3,4 mol de CO<sub>2</sub>.

Dosado estequiométrico: 15,63 kg/kg

PCI mezcla: 2,77 MJ/kg

⇒ 

65,47 g CO <sub>2</sub> /MJ	235,71 g CO <sub>2</sub> /kWh
-----------------------------	-------------------------------

### Gas Natural

Composición: 90% CH<sub>4</sub> + otros

A partir de la combustión de un mol de metano se obtiene 1 mol de CO<sub>2</sub>.

Dosado estequiométrico: 16,23 kg/kg

PCI mezcla: 2,82 MJ/kg

⇒ 

48,40 g CO <sub>2</sub> /MJ	174,27 g CO <sub>2</sub> /kWh
-----------------------------	-------------------------------

### Hidrógeno

Composición: H<sub>2</sub>

A partir de la combustión de un mol de hidrógeno no se obtiene CO<sub>2</sub>.

⇒ 

0 g CO <sub>2</sub> /MJ	0 g CO <sub>2</sub> /kWh
-------------------------	--------------------------

Una vez calculadas, se valoran las emisiones de CO<sub>2</sub> de cada combustible mediante las gráficas comparativas que se presentan a continuación. En la Figura 7.11 se puede destacar el hidrógeno con una emisión nula, ya que no contiene carbono en su composición.

La emisión del biogás se separa en dos partes debido a las causas que la provocan. La parte inferior indica la cantidad de CO<sub>2</sub> que emite este combustible debida a la combustión. En cambio, la parte superior se refiere a la emisión debida a la composición del gas, que ya contiene este contaminante. A efectos comparativos el interés radica en la proporción de emisión debida a la combustión.



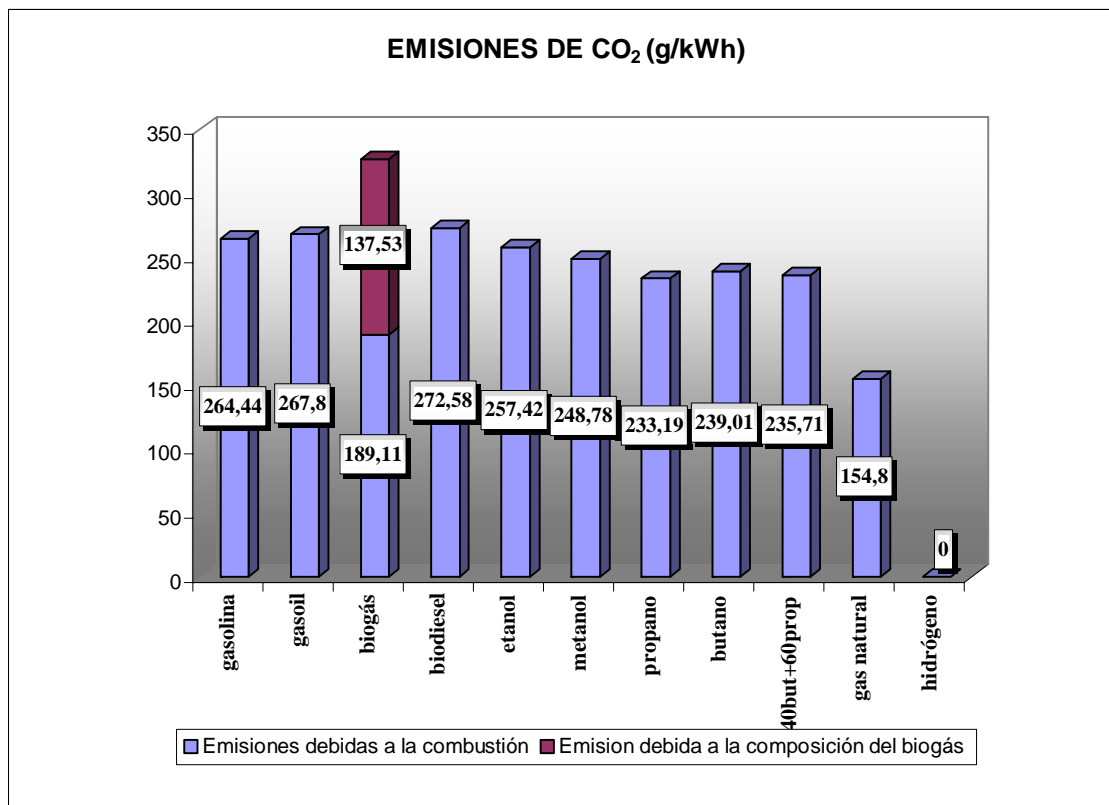


Fig. 7.11. Gráfico comparativo de las emisiones teóricas de CO<sub>2</sub> para los combustibles analizados

Con el fin de valorar los posibles combustibles sustitutos de la gasolina y el gasoil se representa la reducción porcentual de las emisiones producidas por los nuevos combustibles respecto a los tradicionales. Los carburantes que trabajan con motores de encendido provocado se comparan respecto a la gasolina y los que trabajan con motores de encendido por compresión, respecto al gasoil. Hay que añadir que para realizar esta gráfica sólo se consideran las emisiones debidas a la combustión. Estos datos se muestran en la Figura 7.12.





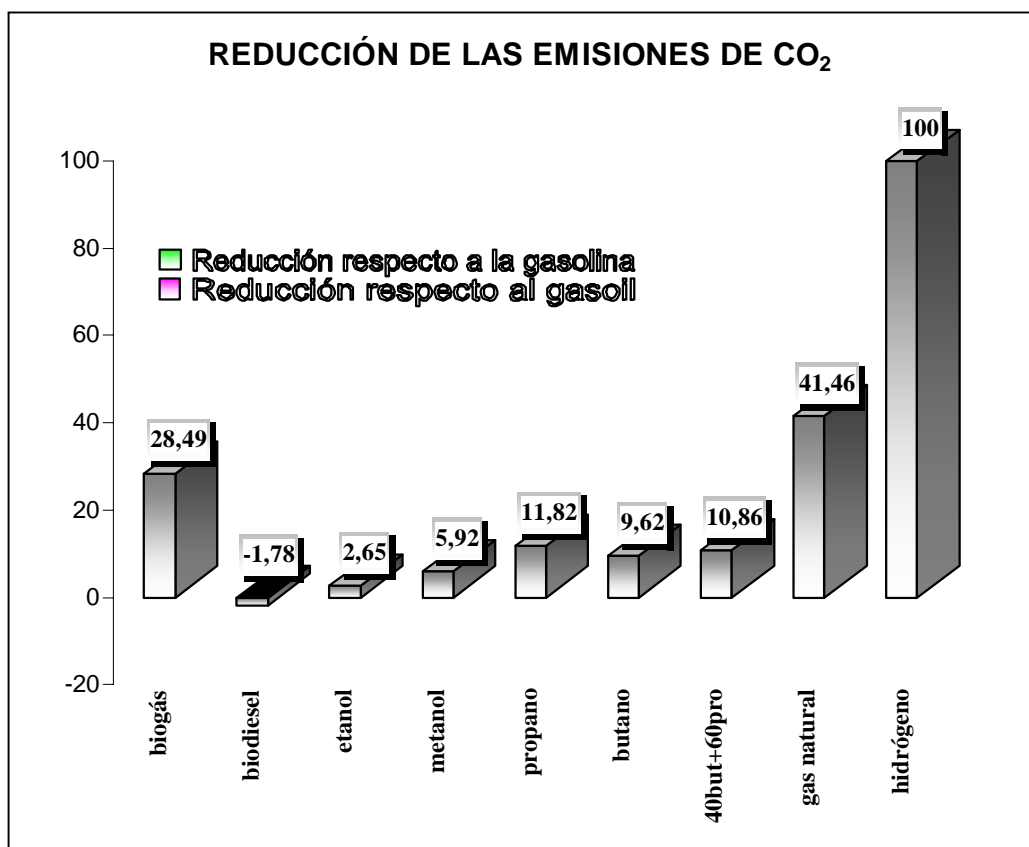


Fig. 7.12. Gráfico que muestra el porcentaje de reducción de emisión de CO<sub>2</sub> de los combustibles alternativos respecto al gasoil (biodiesel) o a la gasolina (los restantes)

Sin tener en cuenta el Hidrógeno, que no produce CO<sub>2</sub> por no contener carbono en su composición, las emisiones teóricas más bajas de este contaminante las produce el Gas Natural. Respecto a la gasolina, se reducen un 41,46 % (como se puede observar en la gráfica 2).

La producción de CO<sub>2</sub> debida a la combustión de biogás es considerablemente menor a la que se obtendría funcionando con gasolina, se produce una reducción teórica de un 28,49 %. No se tiene en cuenta la emisión de CO<sub>2</sub> debida a la propia composición del biogás, considerada de un 40% aproximadamente, ya que la producción de este contaminante es inherente a todo proceso de fermentación o degradación de materia orgánica. Por esta razón no se ha de contabilizar para medir una reducción o aumento de emisión de dióxido de carbono. En la Figura 7.13 se describe un posible ciclo de uso del biogás en la automoción.



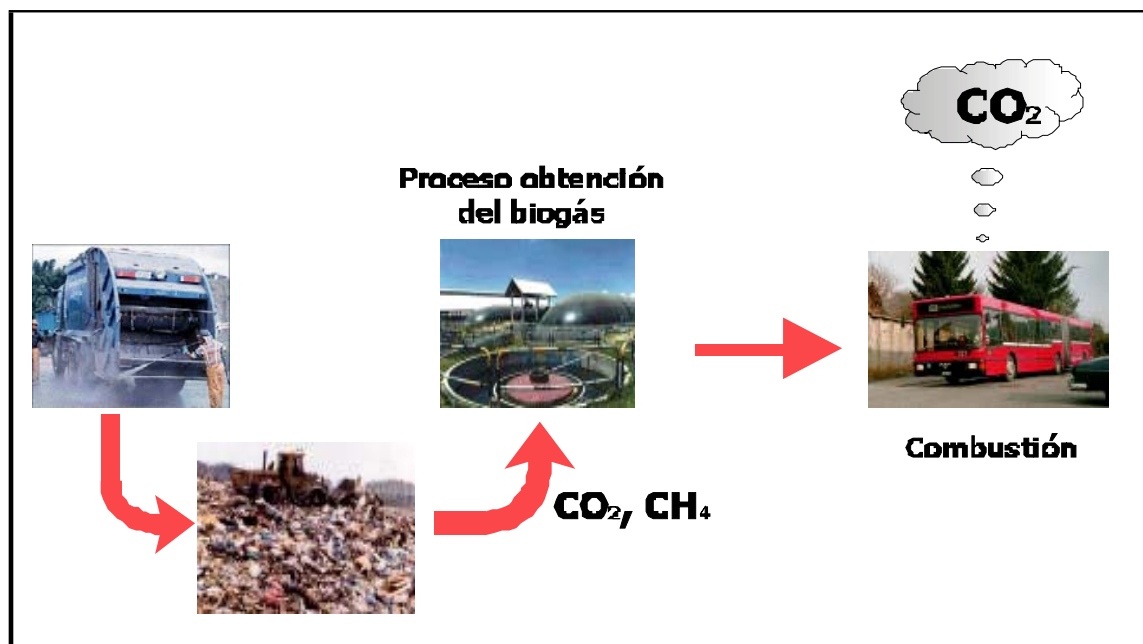


Fig. 7.13. Gráfico que muestra el ciclo de  $\text{CO}_2$  del biogás desde su obtención hasta su uso en automoción

Tanto los biocarburantes utilizados para ciclo Otto (alcoholes) como los Gases Licuados del Petróleo, también utilizados en ciclo Otto, presentan una reducción de emisión de  $\text{CO}_2$  respecto a la gasolina, pudiendo destacar el propano con una disminución del 11,82%. Esta reducción se debe fundamentalmente al menor número de carbonos en la composición de estos combustibles.

El biodiesel, por el contrario, muestra una reducción negativa. Aunque mínimo, se produce un ligero aumento de la emisión de este contaminante respecto al gasoil. Pero este aumento se ve compensado por el origen del biocarburante. La vegetación de la que procede el biodiesel necesita  $\text{CO}_2$  para realizar la fotosíntesis. Por lo tanto, la emisión que se obtiene al quemar este combustible en un motor alternativo de combustión interna cerraría el ciclo que utilizaría este  $\text{CO}_2$  emitido para alimentar el cultivo que produciría de nuevo el biodiesel, como se indica en la Figura 7.14.



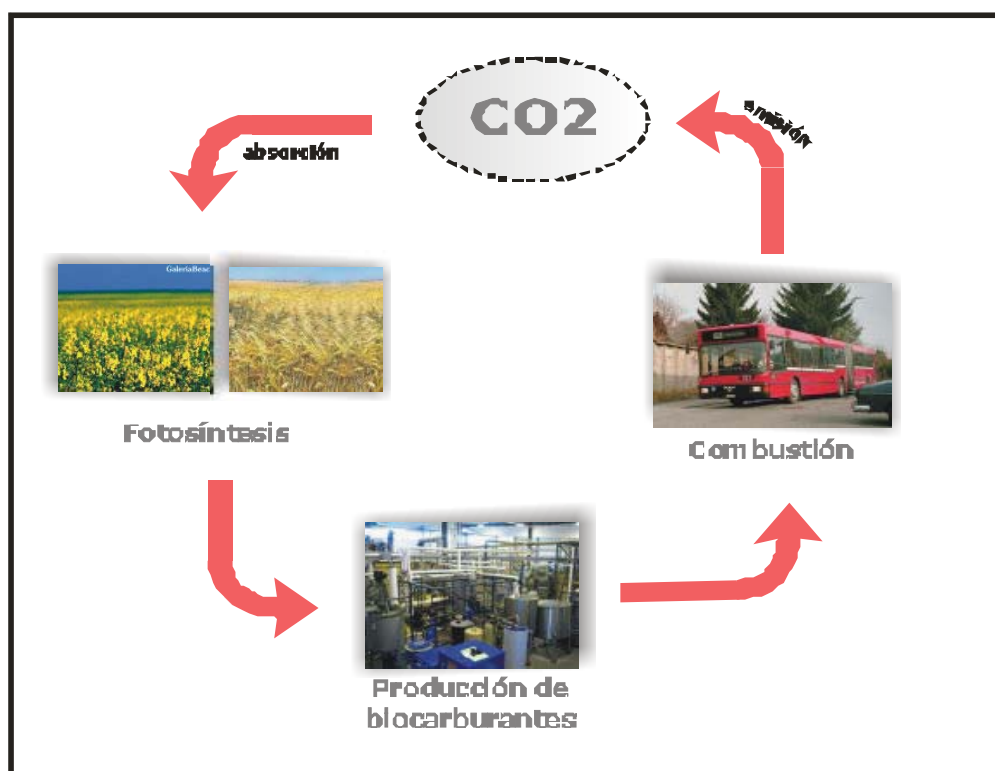


Fig. 7.14. Gráfico que indica el ciclo de CO<sub>2</sub> del biodiesel desde su formación hasta su uso en automoción

Las emisiones de CO<sub>2</sub> están reguladas con una serie de normativas que limitan su emisión y que han de tener en cuenta todos los fabricantes de automóviles. El Protocolo de Kyoto tiene como objetivo reducir las emisiones de una serie de gases de efecto invernadero en un 8% durante el periodo 2008-2012 en relación a los niveles de emisiones emitidas en el año 1990.

Esta estrategia comunitaria para reducir CO<sub>2</sub> se centra en:

- Fabricantes de automóviles: acuerdos entre el sector automovilístico y la UE en los cuales: se establece un valor medio de 120 g CO<sub>2</sub>/ km para cumplir como muy tarde en el año 2010.
- Consumidores:



- marco fiscal: medidas que incentivan la compra de vehículos menos contaminantes.
- Información al consumidor sobre el consumo de combustibles de los vehículos.

### 7.3.2. CO, HC, NO<sub>x</sub> y partículas

La contaminación atmosférica debida al transporte es muy diversa y depende de diferentes factores, las propiedades del combustible utilizado, el tipo de mezcla con el aire y las características del funcionamiento del motor, como pueden ser la temperatura de trabajo, el ciclo empleado o el tipo de inyección del combustible. Por esta razón el análisis cuantitativo de las emisiones contaminantes se debe realizar a partir de un estudio experimental analizando cada proceso independientemente. En el presente estudio se da una pincelada general sobre las características de las principales emisiones producidas al utilizar un motor alternativo de combustión interna y se hace una valoración aproximada de su generación según el tipo de combustible empleado.

Las emisiones características que se analizan a continuación son CO, HC, NO<sub>x</sub> y partículas. Las características, causas y consecuencias que provocan la generación y expulsión al medio de cada una de las sustancias comentadas se describen a continuación.

- **CO**: es un gas tóxico, incoloro, inodoro e insípido que se produce por falta de la cantidad de O<sub>2</sub> necesaria que permita completar la reacción de combustión. La generación de CO se produce en un paso previo a la creación de CO<sub>2</sub>, por lo tanto primero se genera todo el CO y a continuación el dióxido de Carbono que sea posible según la cantidad de O<sub>2</sub> disponible. Por un lado provoca la destrucción del ozono estratosférico lo que conlleva riesgos para la salud (asociados a la radiación ultravioleta) y puede producir alteraciones en la fauna y flora. Por otro lado, provoca la formación de ozono troposférico, lo que contribuye al efecto invernadero alterando la calidad de la atmósfera y de los ecosistemas.

**HC**: son una mezcla de compuestos que se producen por falta de oxígeno o exceso de combustible para realizar la combustión completa de todo el hidrocarburo suministrado. Provocan la llamada niebla fotoquímica que produce turbidez y suciedad atmosféricas y riesgos para la salud.



**NO<sub>x</sub>:** la emisión de este contaminante es independiente al proceso de combustión. Debido a las altas presiones y temperaturas que se generan en la cámara de combustión el nitrógeno y el oxígeno presentes en el aire reaccionan dando lugar a los óxidos de nitrógeno. Las altas temperaturas y el exceso de O<sub>2</sub> favorecen la aparición de estos gases. Estas sustancias son muy perjudiciales para el medio. Son responsables del efecto invernadero y provocan la destrucción del ozono estratosférico, lo que conlleva a riesgos en la salud asociados a la radiación ultravioleta y alteraciones en la fauna y la flora de los ecosistemas. Y, a su vez, contribuyen a la formación de ozono troposférico provocando pérdidas en la calidad de la atmósfera y de los ecosistemas y convirtiéndose en un riesgo para la salud adicional.

**Partículas:** pueden ser sustancias sólidas y/o líquidas y su emisión esta provocada por problemas en la formación de la mezcla de aire y combustible. Se produce en el funcionamiento de motores trabajando con ciclo Diesel. La emisión de partículas provoca turbidez y suciedad atmosféricas, lo que conlleva riesgos para la salud relacionados con problemas de pulmón y de corazón.

En la Tabla 7.8 se distingue de manera genérica la proporción de la producción de los contaminantes más comunes para cada uno de los combustibles analizados.

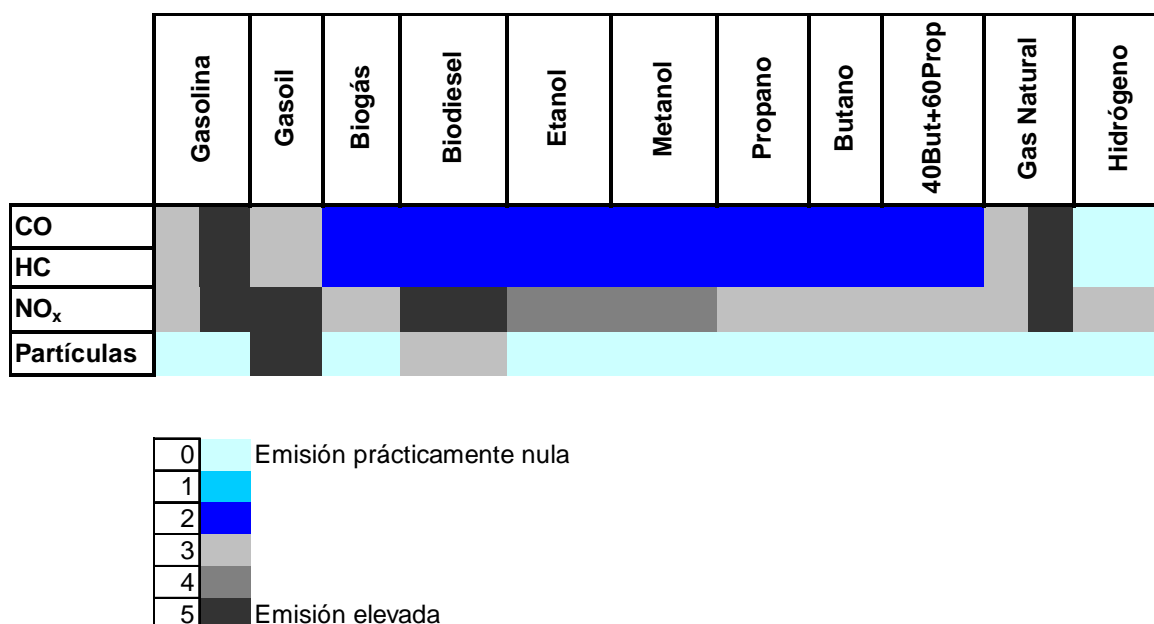


TABLA 7.8. Tabla de emisiones contaminantes para cada uno de los combustibles analizados



Se observa claramente que el combustible más limpio de los analizados es el Hidrógeno, emitiendo de manera singular contaminación de óxidos de Nitrógeno. La emisión de este contaminante se debe a factores relacionados con las temperaturas que se generan en la cámara de combustión, por esta razón se producen con cada uno de los combustibles.

Actualmente todos los combustibles cumplen la normativa vigente respecto a las emisiones de motores de combustión interna. Esta normativa Europea se resume en las Tablas 7.9 y 7.10, donde se pueden diferenciar los requisitos en función de si trabajan con ciclo Otto o con ciclo Diesel y en función de las características del vehículo (turismos, categoría M, y vehículos pesados y medios, categoría N).

Fases y ciclos de pruebas		CO	HC totales	HC no metánicos	CH <sub>4</sub> <sup>1</sup>	NO <sub>x</sub>	Partículas <sup>2</sup>	Humos
<b>Euro 1</b> 1.10.1993	Ciclo de pruebas de 13 fases	4,5	1,1	---	---	8	0,612 <85 kW 0,360 >85 kW	---
<b>Euro 2</b> 1.10.1996	Ciclo de pruebas de 13 fases	4	1,1	---	---	7	0,25 <sup>3</sup>	---
<b>Euro 3</b> 1.10.2000	ESC/ELR	2,1	0,66	---	---	5	0,1 0,13 <sup>4</sup>	0,8
	ETC	5,45	---	0,78	1,6	5	0,16 0,21	---
<b>Euro 4</b> 1.10.2005	ESC/ELR	1,5	0,46	---	---	3,5	0,02	0,5
	ETC	4	---	0,55	1,1	3,5	0,03	---
<b>Euro 5</b> 1.10.2008	ESC/ELR	1,5	0,46	---	---	2	0,02	0,5
	ETC	4	---	0,55	1,1	2	0,03	---
<b>VEM<sup>5</sup></b> 1.10.1999	ESC/ELR	1,5	0,25	---	---	2	0,02	0,15
	ETC	3	---	0,4	0,65	2	0,02	---

<sup>1</sup> Para motores de gas natural, exclusivamente.

<sup>2</sup> En ciclo de pruebas ETC, no será aplicable a los motores de gas en las fases Euro 3, Euro 4 y Euro 5.

<sup>3</sup> A partir de octubre de 1998, el límite de partículas para los motores con una cilindrada inferior a los 0,7 dm<sup>3</sup> por cilindro y una velocidad de régimen del motor superior a las 3.000 revoluciones/minuto fue de 0.15 gr/kWh.

<sup>4</sup> Para motores con una cilindrada unitaria inferior a 0,75 dm<sup>3</sup> y un régimen de potencia nominal superior a 3.000 min<sup>-1</sup>.

<sup>5</sup> Vehículos Ecológicos Mejorados. Sus valores no son obligatorios para el resto de vehículos.

**TABLA 7.9.** Límites de emisiones para vehículos medios y pesados. Motores diesel, gas natural y GLP. Fases Euro 1, Euro 2 y Directiva 99/96/CE, del 13 de diciembre de 1999: Euro 3, Euro 4, Euro 5 y VEM en gr/kWh (humos: en m<sup>-1</sup>)



La prueba ESC es un ciclo de pruebas estacionario que consiste en un procedimiento de 13 fases de estado continuo que miden las emisiones de gases y de partículas. Las pruebas ELR sirven para medir las opacidades de los humos. El ciclo ETC se utiliza para medir las emisiones de escape de los motores a gas.

			Masa de referencia (RW) (kg)	Valores límite								
				Masa del monóxido de carbono (CO)		Masa de hidrocarburos (HC)		Masa de los óxidos de nitrógeno (NO <sub>x</sub> )		Masa combinada del hidrocarburo y los óxidos de nitrógeno (HC + NO <sub>x</sub> )		Masa de las partículas <sup>(1)</sup> (PM)
				L <sub>1</sub> (g/km)		L <sub>2</sub> (g/km)		L <sub>3</sub> (g/km)		L <sub>2</sub> + L <sub>3</sub> (g/km)		L <sub>4</sub> (g/km)
Categoría		Clase		Gasolina	Gasóleo	Gasolina	Gasóleo	Gasolina	Gasóleo	Gasolina	Gasóleo	Gasóleo
A (2000)	M <sup>(2)</sup>	—	todas	2,3	0,64	0,20	—	0,15	0,50	—	0,56	0,05
	N <sub>1</sub> <sup>(3)</sup>	I	RW ≤ 1305	2,3	0,64	0,20	—	0,15	0,50	—	0,56	0,05
		II	1305 < RW ≤ 1760	4,17	0,80	0,25	—	0,18	0,65	—	0,72	0,07
		III	1760 < RW	5,22	0,95	0,29	—	0,21	0,78	—	0,86	0,10
B (2005)	M <sup>(2)</sup>	—	todas	1,0	0,50	0,10	—	0,08	0,25	—	0,30	0,025
	N <sub>1</sub> <sup>(3)</sup>	I	RW ≤ 1305	1,0	0,50	0,10	—	0,08	0,25	—	0,30	0,025
		II	1305 < RW ≤ 1760	1,81	0,63	0,13	—	0,10	0,33	—	0,39	0,04
		III	1760 < RW	2,27	0,74	0,16	—	0,11	0,39	—	0,46	0,06

(1) Para motores diesel.

(2) Salvo los motores cuya masa máxima sobrepase 2 500 kg.

(3) Y los vehículos de la categoría M especificados en la nota 2.ª.

**TABLA 7.10.** Directiva 99/69/CE de 13 de Octubre de 1998 (Diario Oficial de la Unión Europea núm. L 350, de 28.12.1998), que hace referencia a vehículos de la categoría M y N1 (transporte de mercancías hasta 3500 kg de MMA).

La aplicación de la Directiva 99/69/CE en el caso de los combustibles alternativos se basarían en lo siguiente: el biodiesel se rige por la misma normativa que el gasóleo, en cambio los alcoholes, el biogás, los GLP y el gas natural deberán cumplir los límites establecidos en la Tabla 7.10 para la gasolina ya que la división se establece según el tipo de ciclo térmico utilizado en el motor. Actualmente no hay ninguna normativa vigente exclusiva para el uso de hidrógeno en MACI, pero al tratarse de un combustible que se utilizaría con ciclo Otto debería regularse de la misma manera que la gasolina.







## 8. Conclusiones

Las conclusiones resultado del estudio se presentan como una valoración de cada combustible alternativo: biogás, biocarburantes, gases licuados del petróleo, gas natural e hidrógeno.

Cabe destacar que a pesar de disponer de datos significativamente comparables no se puede establecer una valoración absoluta de si un combustible es mejor o peor que otro. El análisis completo depende además de otros factores externos a la extensión que abarca el presente proyecto. Algunos de estos factores son: el coste de obtención y producción de las nuevas tecnologías energéticas, las posibles adaptaciones que debieran realizarse en los motores y la legislación y normativa económicas aplicadas a cada una de ellas para el uso en MACI.

Estas valoraciones se describen desde la Tabla 8.1 hasta la Tabla 8.7.

<b>BIOGÁS</b>	
<b>La utilización del biogás en motores MACI de encendido provocado presenta diversas dificultades que en estos momentos no lo convierten en un combustible competitivo para la automoción.</b>	
<b>VENTAJAS</b>	<b>INCONVENIENTES</b>
Diversificación energética Combustible renovable Poder antidetonante elevado, buena combustión en MEP Las emisiones de CO <sub>2</sub> se reducen considerablemente respecto a las producidas utilizando gasolina Las emisiones de CO y HC se reducen ligeramente	Necesidad de comprimirlo o licuarlo por su baja densidad Bajo poder calorífico (dependiendo de la composición) El reducido valor del dosado estequiométrico provoca un aumento del consumo específico El aumento del consumo específico provoca una disminución en la autonomía del vehículo en comparación con la gasolina Aumento de coste debido a la inversión inicial de nueva instalación

TABLA 8.1. Conclusiones y valoración del biogás



<b>BIODIESEL</b>	
<b>Combustible alternativo líquido de origen vegetal que se utiliza en motores de encendido por compresión. Su desarrollo está muy avanzado debido a las múltiples ventajas que aporta como sustituto del gasoil y al mínimo nivel de modificaciones en el motor que conlleva su uso.</b>	
<b>VENTAJAS</b>	<b>INCONVENIENTES</b>
<p>Diversificación energética</p> <p>Combustible renovable</p> <p>Posee una elevada densidad lo que le permite una mayor capacidad de almacenamiento</p> <p>El contenido energético de la mezcla con aire es adecuado aunque el PCI del biodiesel sea ligeramente inferior al del gasoil.</p> <p>Se puede obtener una autonomía muy similar a la que se obtiene con el gasoil debido a su consumo específico teórico y a su elevada densidad</p> <p>El número de cetano permite un control de la combustión y un aumento de la eficiencia del motor</p> <p>Debido al origen vegetal del combustible su uso en MACI no produce aumento de las emisiones de CO<sub>2</sub></p>	<p>El poder calorífico es menor que el del gasoil</p> <p>El dosado estequiométrico es menor que el del gasoil lo que implicaría modificaciones en los conductos de admisión</p> <p>No se reducen las emisiones de óxidos de nitrógeno</p>

TABLA 8.2. Conclusiones y valoración del biodiesel

<b>ETANOL</b>	
<b>Combustible alternativo líquido de origen vegetal que estaría indicado para trabajar en motores de ciclo Otto. Su contenido energético y la autonomía son reducidos. Es más adecuado y común utilizarlo como aditivo de la gasolina.</b>	
<b>VENTAJAS</b>	<b>INCONVENIENTES</b>
<p>Diversificación energética</p> <p>Combustible renovable</p> <p>La elevada densidad permite una gran capacidad de almacenamiento</p> <p>El contenido energético de la mezcla con aire es adecuado aunque el PCI del etanol es muy inferior al de la gasolina</p> <p>Elevado índice de octano proporcionando eficiencia a la combustión</p> <p>Disminución de las emisiones de CO<sub>2</sub>, CO y HC</p>	<p>Su contenido energético es muy reducido</p> <p>El dosado estequiométrico es muy inferior al de la gasolina, debido a la presencia de O<sub>2</sub> en su formulación, lo que implicaría modificaciones en los conductos de admisión</p> <p>El consumo específico es elevado lo que conduce a un aumento del tanque y, por lo tanto, un aumento del peso del vehículo</p> <p>Dificultades en el arranque en frío debido a la volatilidad</p>

TABLA 8.3. Conclusiones y valoración del etanol



<b>METANOL</b>	
<b>Combustible alternativo líquido de origen vegetal que estaría indicado para trabajar en motores de ciclo Otto. Su contenido energético y la autonomía son reducidos. Es más adecuado y común utilizarlo como aditivo de la gasolina.</b>	
<b>VENTAJAS</b>	<b>INCONVENIENTES</b>
<p>Diversificación energética</p> <p>Combustible renovable (si procede de biomasa)</p> <p>La elevada densidad permite una gran capacidad de almacenamiento</p> <p>El contenido energético de la mezcla con aire es adecuado aunque el PCI del etanol es muy inferior al de la gasolina</p> <p>Elevado índice de octano proporcionando eficiencia a la combustión</p> <p>Disminución de las emisiones de CO<sub>2</sub>, CO y HC</p>	<p>Su contenido energético es muy reducido por la gran proporción de O<sub>2</sub> en su formulación</p> <p>El dosado estequiométrico es muy inferior al de la gasolina y al etanol, debido a la presencia de O<sub>2</sub> en su formulación, lo que implicaría mayores modificaciones en los conductos de admisión</p> <p>El consumo específico es muy elevado lo que conduce a un aumento del tanque y, por lo tanto, un aumento del peso del vehículo</p> <p>Dificultades en el arranque en frío debido a la volatilidad</p> <p>Es un combustible muy tóxico</p> <p>El rango de inflamabilidad es elevado por lo que es fácilmente inflamable</p>

TABLA 8.4. Conclusiones y valoración del metanol

<b>GASES LICUADOS DEL PETRÓLEO</b>	
<b>Combustibles de origen fósil que pueden utilizarse individualmente (propano y butano), o bien como mezclas entre ellos (la más común de 40% butano y 60% propano). Son combustibles alternativos ya introducidos en el sector transportes. Se utilizan en motores de ciclo Otto actualmente en transporte público.</b>	
<b>VENTAJAS</b>	<b>INCONVENIENTES</b>
<p>Poseen una densidad relativamente elevada en estado licuado y son fácilmente licuables</p> <p>Su contenido energético es elevado, sobrepasando el de la gasolina</p> <p>El dosado estequiométrico es muy similar al de la gasolina con lo que se evitan modificaciones en los conductos de admisión</p> <p>Se reducen las emisiones de CO<sub>2</sub> sobre un 10% respecto a la gasolina, y más ligeramente el CO y el HC</p> <p>Buen poder antidetonante, alrededor de 100.</p>	<p>Dependencia del petróleo</p> <p>A pesar de obtener unos límites de consumo específico similares a la gasolina proporciona una autonomía menor</p>

TABLA 8.5. Conclusiones y valoración de los gases licuados del petróleo



GAS NATURAL	
<b>Combustible alternativo introducido en el transporte, principalmente en estado comprimido, para flotas grandes de vehículos. Es el combustible fósil más limpio para su uso en motores de encendido provocado.</b>	
VENTAJAS	INCONVENIENTES
<p>Diversificación energética</p> <p>Es un combustible abundante</p> <p>Poder calorífico ligeramente superior al de la gasolina dependiendo de la procedencia del gas</p> <p>Elevado poder antidetonante, debido al contenido en CO<sub>2</sub> en la composición, que favorece el rendimiento del motor</p> <p>Reducción en las emisiones contaminantes, destaca la reducción de aproximadamente un 40% de CO<sub>2</sub></p>	<p>La densidad del GNC es mucho menor que la de la gasolina, lo que implica un aumento del tanque y una disminución de la autonomía</p> <p>Al licuar el GN se consigue aumentar su densidad y con ello su capacidad de almacenamiento pero no es fácilmente licuable</p> <p>Los consumos específicos inferior y superior son similares a los de la gasolina pero, debido a la densidad, la autonomía disminuye considerablemente (considerado licuado)</p>

TABLA 8.6. Conclusiones y valoración del gas natural

HIDRÓGENO	
<b>Combustible alternativo en proceso de desarrollo en el campo de la automoción. Es el combustible más limpio que existe y puede utilizarse en motores que trabajan con ciclo Otto, pero la peligrosidad en su manipulación frena su desarrollo.</b>	
VENTAJAS	INCONVENIENTES
<p>Diversificación energética</p> <p>Posee el PCI más elevado de los combustibles considerados</p> <p>Consumos específicos inferior y superior muy reducidos respecto a la gasolina</p> <p>Emisiones nulas de CO<sub>2</sub>, CO, HC y partículas</p>	<p>Elevada complejidad técnica de obtención a pesar de ser un elemento muy abundante en la naturaleza pero siempre combinado</p> <p>Posee una densidad muy baja lo que implica un aumento del tanque y del peso del vehículo tanto HL, HC</p> <p>Complejidad técnica a la hora de licuar el combustible y almacenarlo licuado (depósitos criogénicos)</p> <p>Es un combustible altamente inflamable (elevados límites de inflamabilidad y elevado dosado estequiométrico), lo que dificulta su operación</p> <p>Bajo número de octano que provoca una disminución del rendimiento del motor</p>

TABLA 8.7. Conclusiones y valoración del hidrógeno



## Perspectivas de futuro

Algunos de los inconvenientes que presenta el uso de combustibles alternativos individualmente se puede solucionar formando mezclas de los distintos carburantes en las proporciones adecuadas. De esta manera se pueden llegar a obtener combustibles, que podrían denominarse coloquialmente “Combustibles a la carta”, capaces de responder satisfactoriamente a casi todos los requerimientos necesarios para su uso en motores alternativos de combustión interna.

El objetivo propuesto sería escoger las propiedades más adecuadas y ventajosas de cada uno de los combustibles disponibles y combinarlas en la proporción adecuada para obtener un carburante a medida en cada aplicación concreta.





## Agradecimientos

Queremos agradecer en primer lugar la documentación facilitada por el Instituto Catalán de la Energía (ICAEN), y la atención recibida por los profesionales que se encargaron de nuestras consultas.

También expresamos nuestro agradecimiento al Departamento de Desarrollo Motores IVECO Pegaso, S.L., por la información facilitada y por permitirnos visitar la fábrica situada en Zona Franca (Barcelona).

Agradecemos especialmente su colaboración desinteresada a Marc Andujar Jornet, subdirector general de Ordenación y Gestión del Ministerio de Dirección General de Puertos y Transportes.

En último lugar, y no por ello menos relevante, un especial agradecimiento al director del proyecto Jesús Álvarez Flórez por el apoyo y la ayuda proporcionada durante la elaboración del estudio.







## Bibliografía

- [1] R. Careras Planells, Á. Comas Amengual, A. Calvo Larruy, Motores de Combustión Interna. Fundamentos, *Ediciones UPC*: 1995.
- [2] D. Giacosa, Motores Endotérmicos, *Edición Omega S.A.*: 1988.
- [3] M. Muñoz Rodríguez, F. Moreno Gómez, J. Morea Roy, Motores Alternativos de Combustión Interna, *Prensas Universitarias de Zaragoza*: 1999.
- [4] J. L. Lorenzo Becco, Los G.L.P, *Repsol-Butano S.A.*: 1989.
- [5] J. Álvarez Flórez, I. Callejón Agramunt, Máquinas Térmicas Motores Vol. 2, *Ediciones UPC*: 2002.
- [6] Departamento de Máquinas y Motores Térmicos de Universitat Politècnica De Catalunya, Taules i Gràfiques de Propietats Termodinàmiques, *Publicacions d'Abast S.L.L.*: 1999.
- [7] Las páginas principales de internet que se han consultado durante la fase de documentación del proyecto se indican a continuación. La última fecha de consulta ha sido Abril de 2004.

<http://europa.eu.int/scadplus/leg/es/lvb/l21061.htm>

<http://www.stauto.org/stauto/Biocarburantes%20STA%20OCT%202002%20red.pdf>

<http://usuarios.lycos.es/biodieseltr/hobbies3.html>

<http://www.oilfox.com.ar/principal.htm>

<http://www.cleanairnet.org/>

<http://www.uamerica.edu.co/motores.htm>

<http://www.conae.gob.mx>

<http://www.cidaut.es>

<http://www.naturalgas.org>

<http://www.icaen.es>



Associació de Mestres Rosa Sensat, Fundación TIERRA [<http://www.ecoterra.org>]

<http://www.aeh2.org>

<http://www.biodiesel.com.ar>

<http://www.gnv.cl>

<http://www.ambientum.com>

Libro electrónico ciencias de la tierra y del medioambiente [<http://www1.ceit.es>]

<http://www.revelion.org>

*LA BIOSFERA V: LAS GRASAS COMO MATERIA PRIMA*  
[<http://www.sc.ehu.es/iawfemaf/archivos/materia/industrial/libro-14.PDF>]

CNE - Comisión Nacional de Energía [<http://www.cne.es>]



## ANEXOS

### A Presupuesto

El estudio económico del proyecto se desglosa a continuación considerando los gastos relativos a documentación e ingeniería y los gastos de material.

#### A.1 Gastos de investigación y desarrollo

Los gastos de investigación y desarrollo incluyen los costes que suponen las horas dedicadas a la documentación en energías alternativas para el desarrollo de nuevos combustibles, las horas dedicadas a ingeniería y análisis de datos y las horas empleadas en la organización y elaboración del informe. El coste se presenta en la Tabla A.1.

Se considera un sueldo variable según el tipo de trabajo realizado. Si el trabajo se dedica a horas de búsqueda de información y recogida de datos se considera un precio de 10€/h. Las horas dedicadas a ingeniería y análisis de datos tienen un coste de 20€/h. Y, por último, las horas dedicadas a la organización y elaboración del informe un precio de 15€/h.

CONCEPTO	PRECIO (€/h)	HORAS	COSTE (€)
Búsqueda de información y recogida de datos	10	445	4450
Ingeniería y análisis	20	350	7000
Organización y elaboración del informe	15	345	5175
<b>Total gastos de investigación y desarrollo</b>			<b>16625</b>

TABLA A.1. Desglose de los gastos totales de investigación y desarrollo



## A.2 Gastos de administración

En este apartado se consideran de manera general los gastos debidos a: material de oficina utilizado para la elaboración del proyecto, los gastos debidos al soporte informático empleado y gastos de contacto con empresas y profesionales relacionados con el tema del estudio.

<b>Total gastos de administración</b>	<b>200 €</b>
---------------------------------------	--------------

## A.3 Gastos totales del proyecto

El presupuesto total del proyecto teniendo en cuenta los apartados anteriores es el siguiente.

CONCEPTO	PRECIO (€/h)	HORAS	COSTE (€)
Búsqueda de información y recogida de datos	10	445	4450
Ingeniería y análisis	20	350	7000
Organización y elaboración del informe	15	345	5175
<b>Gastos de investigación y desarrollo</b>			<b>16625</b>
<b>Gastos de administración</b>			<b>200</b>
<b>TOTAL PRESUPUESTO DEL PROYECTO</b>			<b>16825</b>

---

TABLA A.2. Desglose del presupuesto del proyecto



## B Cálculos

A continuación se detallan los cálculos realizados para cuantificar algunas de las propiedades de los combustibles. Estos cálculos son teóricos y están basados en las siguientes suposiciones:

- La reacción de combustión producida en los cilindros del motor es estequiométrica (mezcla estequiométrica de combustible y aire)
- Se considera un rango del rendimiento del motor para todos los combustibles analizados ( $\eta_{\text{Ciclo Otto}} = 0.23 - 0.28$ ,  $\eta_{\text{Ciclo Diesel}} = 0.27 - 0.35$ )
- La proporción de Oxígeno en el aire es de un 20,9 % en volumen.
- No se tienen en cuenta los efectos de la temperatura producidos en el funcionamiento del motor a la hora de calcular las propiedades.

### B.1 Cálculo Del Dosado Estequiométrico

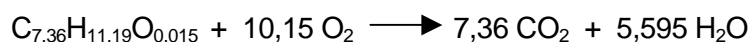
El dosado estequiométrico indica las unidades de aire que precisa una unidad de carburante para combustionar completamente. Su cálculo se determina a partir de la reacción estequiométrica de combustión, ésta nos indica la cantidad de oxígeno que se necesita para quemar todo el combustible y a partir del oxígeno se determina la cantidad de aire equivalente.

Todos los cálculos se realizan en condiciones ambientales.

#### ▪ Gasolina

- Composición:  $C_{7,36}H_{11,19}O_{0,015}$

Reacción de combustión:



$$1 \text{ mol gasolina} = 99,75 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$$

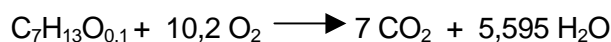
$$10,15 \text{ mol } O_2 \times \frac{24,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3}{1 \text{ mol } O_2} \times \frac{100 \text{ m}^3 \text{ aire}}{20,9 \text{ m}^3 O_2} \times \frac{1,1847 \text{ kg}}{1 \text{ m}^3 \text{ aire}} = 1,404 \text{ kg aire}$$

$$\text{Dosado estequiométrico} = \frac{1,404 \text{ kg aire}}{99,75 \cdot 10^{-3} \text{ kg gasolina}} = 14,07 \text{ kg aire / kg gasolina}$$



- Composición:  $C_7H_{13}O_{0,1}$

Reacción de combustión:



$$1 \text{ mol gasolina} = 98,6 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$$

$$10,2 \text{ mol } O_2 \times \frac{24,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3}{1 \text{ mol } O_2} \times \frac{100 \text{ m}^3 \text{ aire}}{20,9 \text{ m}^3 O_2} \times \frac{1,1847 \text{ kg}}{1 \text{ m}^3 \text{ aire}} = 1,411 \text{ kg aire}$$

$$\text{Dosado estequiométrico} = \frac{1,411 \text{ kg aire}}{98,6 \cdot 10^{-3} \text{ kg gasolina}} = 14,31 \text{ kg aire / kg gasolina}$$

#### ▪ Gasoil

- Composición:  $C_{14,3}H_{26,2}$

Reacción de combustión:



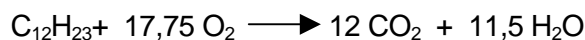
$$1 \text{ mol gasoil} = 0,19836 \text{ kg}$$

$$20,85 \text{ mol } O_2 \times \frac{24,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3}{1 \text{ mol } O_2} \times \frac{100 \text{ m}^3 \text{ aire}}{20,9 \text{ m}^3 O_2} \times \frac{1,1847 \text{ kg}}{1 \text{ m}^3 \text{ aire}} = 2,884 \text{ kg aire}$$

$$\text{Dosado estequiométrico} = \frac{2,884 \text{ kg aire}}{0,19836 \text{ kg gasoil}} = 14,54 \text{ kg aire / kg gasoil}$$

- Composición:  $C_{12}H_{23}$

Reacción de combustión:



$$1 \text{ mol gasoil} = 0,167 \text{ kg}$$

$$17,75 \text{ mol } O_2 \times \frac{24,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3}{1 \text{ mol } O_2} \times \frac{100 \text{ m}^3 \text{ aire}}{20,9 \text{ m}^3 O_2} \times \frac{1,1847 \text{ kg}}{1 \text{ m}^3 \text{ aire}} = 2,455 \text{ kg aire}$$

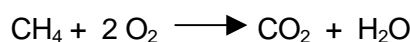
$$\text{Dosado estequiométrico} = \frac{2,455 \text{ kg aire}}{0,167 \text{ kg gasoil}} = 14,70 \text{ kg aire / kg gasoil}$$



## ▪ Biogás

- Composición: 55% CH<sub>4</sub>

Reacción de combustión:



$$1 \text{ mol CH}_4 \times \frac{0,016 \text{ kg}}{1 \text{ mol CH}_4} \times \frac{1 \text{ m}^3 \text{ CH}_4}{0,72 \text{ kg}} \times \frac{1 \text{ m}^3 \text{ biogás}}{0,55 \text{ m}^3 \text{ CH}_4} \times \frac{1,23 \text{ kg}}{1 \text{ m}^3 \text{ biogás}} = 0,0497 \text{ kg biogás}$$

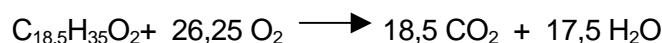
$$2 \text{ mol O}_2 \times \frac{24,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3}{1 \text{ mol O}_2} \times \frac{100 \text{ m}^3 \text{ aire}}{20,9 \text{ m}^3 \text{ O}_2} \times \frac{1,1847 \text{ kg}}{1 \text{ m}^3 \text{ aire}} = 0,2766 \text{ kg aire}$$

$$\text{Dosado estequiométrico} = \frac{0,2766 \text{ kg aire}}{0,0497 \text{ kg biogás}} = 5,56 \text{ kg aire / kg biogás}$$

## ▪ Biodiesel

- Composición: C<sub>18,5</sub>H<sub>35</sub>O<sub>2</sub>

Reacción de combustión:



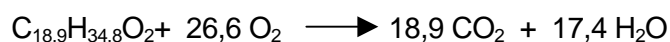
$$1 \text{ mol biodiesel} = 0,289 \text{ kg}$$

$$26,25 \text{ mol O}_2 \times \frac{24,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3}{1 \text{ mol O}_2} \times \frac{100 \text{ m}^3 \text{ aire}}{20,9 \text{ m}^3 \text{ O}_2} \times \frac{1,1847 \text{ kg}}{1 \text{ m}^3 \text{ aire}} = 3,63 \text{ kg aire}$$

$$\text{Dosado estequiométrico} = \frac{3,63 \text{ kg aire}}{0,289 \text{ kg biodiesel}} = 12,56 \text{ kg aire / kg biodiesel}$$

- Composición: C<sub>18,9</sub>H<sub>34,8</sub>O<sub>2</sub>

Reacción de combustión:



$$1 \text{ mol biodiesel} = 0,2941 \text{ kg}$$



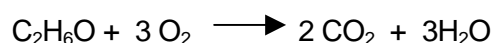
$$26,6 \text{ mol } O_2 \times \frac{24,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3}{1 \text{ mol } O_2} \times \frac{100 \text{ m}^3 \text{ aire}}{20,9 \text{ m}^3 O_2} \times \frac{1,1847 \text{ kg}}{1 \text{ m}^3 \text{ aire}} = 3,68 \text{ kg aire}$$

$$\text{Dosado estequiométrico} = \frac{3,68 \text{ kg aire}}{0,2941 \text{ kg biodiesel}} = 12,51 \text{ kg aire / kg biodiesel}$$

#### ▪ Etanol

- Composición:  $C_2H_6O$

Reacción de combustión:



$$1 \text{ mol etanol} = 0,046 \text{ kg}$$

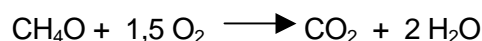
$$3 \text{ mol } O_2 \times \frac{24,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3}{1 \text{ mol } O_2} \times \frac{100 \text{ m}^3 \text{ aire}}{20,9 \text{ m}^3 O_2} \times \frac{1,1847 \text{ kg}}{1 \text{ m}^3 \text{ aire}} = 0,4149 \text{ kg aire}$$

$$\text{Dosado estequiométrico} = \frac{0,4149 \text{ kg aire}}{0,046 \text{ kg etanol}} = 9,02 \text{ kg aire / kg etanol}$$

#### ▪ Metanol

- Composición:  $CH_4O$

Reacción de combustión:



$$1 \text{ mol etanol} = 0,032 \text{ kg}$$

$$1,5 \text{ mol } O_2 \times \frac{24,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3}{1 \text{ mol } O_2} \times \frac{100 \text{ m}^3 \text{ aire}}{20,9 \text{ m}^3 O_2} \times \frac{1,1847 \text{ kg}}{1 \text{ m}^3 \text{ aire}} = 0,207 \text{ kg aire}$$

$$\text{Dosado estequiométrico} = \frac{0,207 \text{ kg aire}}{0,032 \text{ kg metanol}} = 6,48 \text{ kg aire / kg metanol}$$

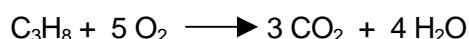
#### ▪ Propano

- Composición:  $C_3H_8$





Reacción de combustión:



1 mol propano = 0,044 kg

$$5 \text{ mol O}_2 \times \frac{24,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3}{1 \text{ mol O}_2} \times \frac{100 \text{ m}^3 \text{aire}}{20,9 \text{ m}^3 \text{O}_2} \times \frac{1,1847 \text{ kg}}{1 \text{ m}^3 \text{aire}} = 0,6910 \text{ kg aire}$$

$$\text{Dosado estequiométrico} = \frac{0,6910 \text{ kg aire}}{0,044 \text{ kg propano}} = 15,72 \text{ kg aire / kg propano}$$

#### ▪ Butano

- Composición:  $\text{C}_4\text{H}_{10}$

Reacción de combustión:



1 mol butano = 0,058 kg

$$6,5 \text{ mol O}_2 \times \frac{24,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3}{1 \text{ mol O}_2} \times \frac{100 \text{ m}^3 \text{aire}}{20,9 \text{ m}^3 \text{O}_2} \times \frac{1,1847 \text{ kg}}{1 \text{ m}^3 \text{aire}} = 0,899 \text{ kg aire}$$

$$\text{Dosado estequiométrico} = \frac{0,899 \text{ kg aire}}{0,058 \text{ kg butano}} = 15,50 \text{ kg aire / kg butano}$$

#### ▪ 40Butano-60Propano

- Composición: 40% $\text{C}_4\text{H}_{10}$  + 60%  $\text{C}_3\text{H}_8$

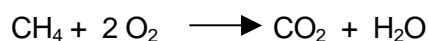
A partir de la proporción de cada componente y de su dosado estequiométrico calculado se calcula el dosado de esta mezcla.

$$\text{Dosado estequiométrico} = (0,6 \times 15,72) + (0,4 \times 15,50) = 15,63 \text{ kg aire / kg 40But + 60Prop}$$

#### ▪ Gas Natural

- Composición: 90%  $\text{CH}_4$

Reacción de combustión:



$$1 \text{ mol } CH_4 \times \frac{0,016 \text{ kg}}{1 \text{ mol } CH_4} \times \frac{1 \text{ m}^3 CH_4}{0,72 \text{ kg}} \times \frac{1 \text{ m}^3 \text{ Gas Natural}}{0,90 \text{ m}^3 CH_4} \times \frac{0,69 \text{ kg}}{1 \text{ m}^3 \text{ Gas Natural}} = 0,017 \text{ kg Gas Natural}$$

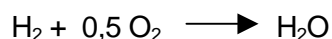
$$2 \text{ mol } O_2 \times \frac{24,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3}{1 \text{ mol } O_2} \times \frac{100 \text{ m}^3 \text{ aire}}{20,9 \text{ m}^3 O_2} \times \frac{1,1847 \text{ kg}}{1 \text{ m}^3 \text{ aire}} = 0,2766 \text{ kg aire}$$

$$\text{Dosado estequiométrico} = \frac{0,2766 \text{ kg aire}}{0,017 \text{ kg Gas Natural}} = 16,23 \text{ kg aire / kg Gas Natural}$$

#### ▪ Hidrógeno

- Composición: H<sub>2</sub>

Reacción de combustión:



$$1 \text{ mol Hidrógeno} = 0,002 \text{ kg}$$

$$0,5 \text{ mol } O_2 \times \frac{24,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3}{1 \text{ mol } O_2} \times \frac{100 \text{ m}^3 \text{ aire}}{20,9 \text{ m}^3 O_2} \times \frac{1,1847 \text{ kg}}{1 \text{ m}^3 \text{ aire}} = 6,9154 \cdot 10^{-2} \text{ kg aire}$$

$$\text{Dosado estequiométrico} = \frac{6,9154 \cdot 10^{-2} \text{ kg aire}}{0,002 \text{ kg Hidrógeno}} = 34,58 \text{ kg aire / kg Hidrógeno}$$

## B.2 Cálculo Del Contenido Energético De La Mezcla

A partir del contenido energético del combustible y del aire necesario para su combustión estequiométrica se obtiene el poder calorífico de la mezcla del carburante con el aire. El PCI de la mezcla se calcula como el contenido energético que posee una cierta cantidad de mezcla.

Todos los cálculos se realizan en condiciones ambientales.

### 1.- Gasolina

- PCI = 43,53 MJ/kg



- Dosado esteq. = 14,19 kg/kg

$$PCI \text{ mezcla} = \frac{43,53 \text{ MJ} / \text{kg}}{(14,19 + 1) \text{ kg mezcla/kg gasolina}} = 2,86 \text{ MJ} / \text{kg mezcla}$$

## 2.- Gasoil

- PCI = 42,69 MJ/kg
- Dosado esteq. = 14,62 kg/kg

$$PCI \text{ mezcla} = \frac{42,69 \text{ MJ} / \text{kg}}{(14,62 + 1) \text{ kg mezcla/kg gasoil}} = 2,73 \text{ MJ} / \text{kg mezcla}$$

## 3.- Biogás

- PCI = 15,33 MJ/kg
- Dosado esteq. = 5,56 kg/kg

$$PCI \text{ mezcla} = \frac{15,33 \text{ MJ} / \text{kg}}{(5,56 + 1) \text{ kg mezcla/kg biogás}} = 2,34 \text{ MJ} / \text{kg mezcla}$$

## 4.- Biodiesel

- PCI = 37,30 MJ/kg
- Dosado esteq. = 12,53 kg/kg

$$PCI \text{ mezcla} = \frac{37,30 \text{ MJ} / \text{kg}}{(12,53 + 1) \text{ kg mezcla/kg biodiesel}} = 2,76 \text{ MJ} / \text{kg mezcla}$$

## 5.- Etanol

- PCI = 26,80 MJ/kg
- Dosado esteq. = 9,02 kg/kg

$$PCI \text{ mezcla} = \frac{26,80 \text{ MJ} / \text{kg}}{(9,02 + 1) \text{ kg mezcla/kg etanol}} = 2,67 \text{ MJ} / \text{kg mezcla}$$



## 6.- Metanol

- PCI = 19,94 MJ/kg
- Dosado esteq. = 6,48 kg/kg

$$PCI_{mezcla} = \frac{19,94 \text{ MJ / kg}}{(7,48 + 1) \text{ kg mezcla/kg metanol}} = 2,66 \text{ MJ / kg mezcla}$$

## 7.- Propano

- PCI = 46,38 MJ/kg
- Dosado esteq. = 15,72 kg/kg

$$PCI_{mezcla} = \frac{46,38 \text{ MJ / kg}}{(15,72 + 1) \text{ kg mezcla/kg propano}} = 2,77 \text{ MJ / kg mezcla}$$

## 8.- Butano

- PCI = 45,71 MJ/kg
- Dosado esteq. = 15,50 kg/kg

$$PCI_{mezcla} = \frac{45,71 \text{ MJ / kg}}{(15,50 + 1) \text{ kg mezcla/kg butano}} = 2,77 \text{ MJ / kg mezcla}$$

## 9.- 40Butano-60Propano

- PCI = 45,99 MJ/kg
- Dosado esteq. = 15,63 kg/kg

$$PCI_{mezcla} = \frac{45,99 \text{ MJ / kg}}{(15,63 + 1) \text{ kg mezcla/kg 40But + 60Prop}} = 2,77 \text{ MJ / kg mezcla}$$

## 10.- Gas Natural

- PCI = 48,71 MJ/kg
- Dosado esteq. = 16,23 kg/kg



$$PCI_{mezcla} = \frac{48,71 MJ / kg}{(16,23 + 1) kg_{mezcla} / kg_{Gas Natural}} = 2,82 MJ / kg_{mezcla}$$

## 11.- Hidrógeno

- PCI = 119,88 MJ/kg
- Dosado esteq. = 34,58 kg/kg

$$PCI_{mezcla} = \frac{119,88 MJ / kg}{(34,58 + 1) kg_{mezcla} / kg_{Hidrógeno}} = 3,37 MJ / kg_{mezcla}$$

## B.3 Cálculo Del Consumo Específico De Cada Combustible

La estimación del consumo específico se deduce a partir de la definición de esta característica calculando la masa de combustible necesaria para obtener una cierta cantidad de energía. En los cálculos se parte de una cantidad de energía final obtenida de 1 kWh y, teniendo en cuenta las consideraciones comentadas al inicio del presente Anexo, se realiza la cuantificación de los límites del consumo según el rango del rendimiento.

Para averiguar la masa de combustible necesaria para obtener 1 kWh de energía final se necesitan los siguientes datos y la relación que se especifica a continuación (Eq. B.1):

- Rendimiento del motor en el que se va a utilizar
- PCI de la mezcla aire+combustible en MJ/kg
- Dosado estequiométrico en kg/kg
- Relación 1 kWh = 3,6 MJ

$$1kwh \times \frac{1}{\eta} \times \frac{3,6 MJ}{1kWh} \times \frac{1}{PCI_{mezcla}} \times \frac{1}{dosado + 1} \times \frac{1000g}{1kg} = x g_{combustible} \quad (Eq. B.1)$$

### 1.- Datos para la gasolina

- Motor Otto,  $\eta \cong 0,23 - 0,28$



- PCI mezcla = 2,86 MJ/kg
- Dosado estq. = 14,19 kg aire/kg comb

## 2.- Datos para el gasoil

- Motor Diesel,  $\eta \cong 0,27 - 0,35$
- PCI mezcla = 2,73 MJ/kg
- Dosado estq. = 14,62 kg aire/kg comb

## 3.- Datos para el biogás

- Motor Otto,  $\eta \cong 0,23 - 0,28$
- PCI mezcla = 2,34 MJ/kg
- Dosado estq. = 5,56 kg aire/kg comb

## 4.- Datos para el biodiesel

- Motor Otto,  $\eta \cong 0,27 - 0,35$
- PCI mezcla = 2,76 MJ/kg
- Dosado estq. = 12,53 kg aire/kg comb

## 5.- Datos para el etanol

- Motor Otto,  $\eta \cong 0,23 - 0,28$
- PCI mezcla = 2,67 MJ/kg
- Dosado estq. = 9,02 kg aire/kg comb

## 6.- Datos para el metanol

- Motor Otto,  $\eta \cong 0,23 - 0,28$
- PCI mezcla = 2,66 MJ/kg
- Dosado estq. = 6,48 kg aire/kg comb



#### 7.- Datos para el propano

- Motor Otto,  $\eta \cong 0,23 - 0,28$
- PCI mezcla = 2,77 MJ/kg
- Dosado estq. = 15,72 kg aire/kg comb

#### 8.- Datos para el butano

- Motor Otto,  $\eta \cong 0,23 - 0,28$
- PCI mezcla = 2,77 MJ/kg
- Dosado estq. = 15,50 kg aire/kg comb

#### 9.- Datos para el 40Butano-60Propano

- Motor Otto,  $\eta \cong 0,23 - 0,28$
- PCI mezcla = 2,77 MJ/kg
- Dosado estq. = 15,63 kg aire/kg comb

#### 10.- Datos para el Gas Natural

- Motor Otto,  $\eta \cong 0,23 - 0,28$
- PCI mezcla = 2,82 MJ/kg
- Dosado estq. = 16,23 kg aire/kg comb

#### 11.- Datos para el Hidrógeno

- Motor Otto,  $\eta \cong 0,23 - 0,28$
- PCI mezcla = 3,37 MJ/kg
- Dosado estq. = 34,58 kg aire/kg comb



Utilizando los datos anteriores y la ecuación (Eq. B.1) se tabulan los límites inferior y superior del consumo específico en la Tabla B.1.

COMBUSTIBLE	Límite inferior	Límite superior
gasolina	295,95	360,29
gasoil	241,21	312,68
biogás	837,58	1019,66
biodiesel	275,44	357,05
etanol	480,58	585,05
metanol	646,19	786,67
propano	277,61	337,95
butano	281,31	342,46
40but+60prop	279,11	339,78
gas natural	264,61	322,14
hidrógeno	107,23	130,54

TABLA B.1. Límites inferior y superior de los consumos específicos habituales de cada combustible analizado

#### B.4 Cálculo De Las Emisiones De CO<sub>2</sub>

Las emisiones de CO<sub>2</sub> se pueden calcular mediante la proporción de contaminante que se genera en la reacción de combustión. Los valores que se obtienen representan la cantidad teórica que se genera de esta sustancia al obtener 1 MJ de energía de mezcla.

▪ **Gasolina:** C<sub>7,18</sub>H<sub>12,1</sub>O<sub>0,06</sub>

Producción de CO<sub>2</sub> → 7,18 moles

$$1MJ \times \frac{1kg \text{ mezcla}}{2,86MJ} \times \frac{1kg \text{ gasolina}}{(14,19 + 1)kg \text{ mezcla}} \times \frac{1mol}{0,099kg \text{ gasolina}} \times \frac{7,18 \text{ moles } CO_2}{1mol \text{ gasolina}} \times \frac{44g \text{ } CO_2}{1mol \text{ } CO_2} = 73,45g \text{ } CO_2$$

Emisiones de CO<sub>2</sub>: 73,45 g CO<sub>2</sub>/MJ      264,44 g CO<sub>2</sub>/kWh





▪ **Gasoil:**  $C_{13,15}H_{24,6}$

Producción de  $CO_2$   $\longrightarrow$  13,15 moles

$$1 MJ \times \frac{1 kg \text{ mezcla}}{2,73 MJ} \times \frac{1 kg \text{ gasoil}}{(14,62 + 1) kg \text{ mezcla}} \times \frac{1 mol}{0,182 kg \text{ gasoil}} \times \frac{13,15 \text{ moles } CO_2}{1 mol \text{ gasoil}} \times \frac{44 g CO_2}{1 mol CO_2} = 73,45 g CO_2$$

Emisiones de  $CO_2$ : 74,39 g  $CO_2$ /MJ      267,80 g  $CO_2$ /kWh

▪ **Biogás:** 55%  $CH_4$  +40%  $CO_2$ + otros

Producción de  $CO_2$   $\longrightarrow$  1 mol

$$1 MJ \times \frac{1 kg \text{ mezcla}}{2,34 MJ} \times \frac{1 kg \text{ biogás}}{(5,56 + 1) kg \text{ mezcla}} \times \frac{1 mol}{1,23 kg \text{ biogás}} \times \frac{0,55 m^3 CH_4}{1 mol \text{ biogás}} \times \frac{1 mol CH_4}{0,0244 m^3 CH_4} \times \frac{1 mol CO_2}{1 mol CH_4} \times \frac{44 g CO_2}{1 mol CO_2} = 52,53 g CO_2$$

Emisiones de  $CO_2$ : 52,53 g  $CO_2$ /MJ      189,11 g  $CO_2$ /kWh

\*Emisiones de la propia composición del biogás

$$1 MJ \times \frac{1 kg \text{ mezcla}}{2,34 MJ} \times \frac{1 kg \text{ biogás}}{(5,56 + 1) kg \text{ mezcla}} \times \frac{1 m^3 \text{ biogás}}{1,23 kg \text{ biogás}} \times \frac{0,4 m^3 CO_2}{1 m^3 \text{ biogás}} \times \frac{1 mol CO_2}{0,0244 m^3 CO_2} \times \frac{44 g CO_2}{1 mol CO_2} = 38,21 g CO_2$$

Emisiones de  $CO_2$  propias: 38,21 g  $CO_2$ /MJ      137,53 g  $CO_2$ /kWh

▪ **Biodiesel:**  $C_{18,7}H_{35}O_2$

Producción de  $CO_2$   $\longrightarrow$  18,7 moles

$$1 MJ \times \frac{1 kg \text{ mezcla}}{2,76 MJ} \times \frac{1 kg \text{ biodiesel}}{(12,53 + 1) kg \text{ mezcla}} \times \frac{1 mol}{0,291 kg \text{ biodiesel}} \times \frac{18,7 \text{ moles } CO_2}{1 mol \text{ biodiesel}} \times \frac{44 g CO_2}{1 mol CO_2} = 75,72 g CO_2$$

Emisiones de  $CO_2$ : 75,72 g  $CO_2$ /MJ      272,58 g  $CO_2$ /kWh

▪ **Etanol:**  $C_2H_6O$

Producción de  $CO_2$   $\longrightarrow$  2 moles

$$1 MJ \times \frac{1 kg \text{ mezcla}}{2,67 MJ} \times \frac{1 kg \text{ etanol}}{(9,02 + 1) kg \text{ mezcla}} \times \frac{1 mol}{0,046 kg \text{ etanol}} \times \frac{2 \text{ moles } CO_2}{1 mol \text{ etanol}} \times \frac{44 g CO_2}{1 mol CO_2} = 71,51 g CO_2$$



Emissiones de CO<sub>2</sub>: 71,51 g CO<sub>2</sub>/MJ      257,42 g CO<sub>2</sub>/kWh

▪ **Metanol:** CH<sub>4</sub>O

Producción de CO<sub>2</sub> → 1 mol

$$1 MJ \times \frac{1 kg \text{ mezcla}}{2,66 MJ} \times \frac{1 kg \text{ metanol}}{(6,48 + 1) kg \text{ mezcla}} \times \frac{1 mol}{0,032 kg \text{ metanol}} \times \frac{1 mol CO_2}{1 mol \text{ metanol}} \times \frac{44 g CO_2}{1 mol CO_2} = 69,11 g CO_2$$

Emissiones de CO<sub>2</sub>: 69,11 g CO<sub>2</sub>/MJ      248,78 g CO<sub>2</sub>/kWh

▪ **Propano:** C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>

Producción de CO<sub>2</sub> → 3 moles

$$1 MJ \times \frac{1 kg \text{ mezcla}}{2,77 MJ} \times \frac{1 kg \text{ propano}}{(15,72 + 1) kg \text{ mezcla}} \times \frac{1 mol}{0,044 kg \text{ propano}} \times \frac{3 moles CO_2}{1 mol \text{ propano}} \times \frac{44 g CO_2}{1 mol CO_2} = 64,77 g CO_2$$

Emissiones de CO<sub>2</sub>: 64,77 g CO<sub>2</sub>/MJ      233,19 g CO<sub>2</sub>/kWh

▪ **Butano:** C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>

Producción de CO<sub>2</sub> → 4 moles

$$1 MJ \times \frac{1 kg \text{ mezcla}}{2,77 MJ} \times \frac{1 kg \text{ butano}}{(15,50 + 1) kg \text{ mezcla}} \times \frac{1 mol}{0,058 kg \text{ butano}} \times \frac{4 moles CO_2}{1 mol \text{ butano}} \times \frac{44 g CO_2}{1 mol CO_2} = 66,39 g CO_2$$

Emissiones de CO<sub>2</sub>: 66,39 g CO<sub>2</sub>/MJ      239,01 g CO<sub>2</sub>/kWh

▪ **40But+60Prop:** C<sub>3,4</sub>H<sub>8,8</sub>

Producción de CO<sub>2</sub> → 3,4 moles



$$1MJ \times \frac{1kg \text{ mezcla}}{2,77 MJ} \times \frac{1kg \text{ 40but} + 60\text{prop}}{(15,63 + 1)kg \text{ mezcla}} \times \frac{1 \text{ mol}}{0,0496kg \text{ 40but} + 60\text{prop}} \times \frac{3,4 \text{ mol } CO_2}{1 \text{ mol 40but} + 60\text{prop}} \times \frac{44 g CO_2}{1 \text{ mol } CO_2} = 65,47 g CO_2$$

Emissiones de CO<sub>2</sub>: 65,47 g CO<sub>2</sub>/MJ      235,71 g CO<sub>2</sub>/kWh

- **Gas Natural:** 90% CH<sub>4</sub> + otros

Producción de CO<sub>2</sub> → 1 mol

$$1MJ \times \frac{1kg \text{ mezcla}}{2,82 MJ} \times \frac{1kg \text{ G.N.}}{(16,23 + 1)kg \text{ mezcla}} \times \frac{1 \text{ mol}}{0,69kg \text{ G.N.}} \times \frac{0,90m^3 CH_4}{1 \text{ mol G.N.}} \times \frac{1 \text{ mol } CH_4}{0,0244m^3 CH_4} \times \frac{1 \text{ mol } CO_2}{1 \text{ mol } CH_4} \times \frac{44 g CO_2}{1 \text{ mol } CO_2} = 48,4 g CO_2$$

Emissiones de CO<sub>2</sub>: 48,4 g CO<sub>2</sub>/MJ      174,27 g CO<sub>2</sub>/kWh

- No se produce emisión de CO<sub>2</sub> utilizando H<sub>2</sub> debido a la no presencia de carbono en su composición.

## B.5 Cálculo De La Densidad De La Mezcla

Para calcular el valor aproximativo de la densidad de la mezcla entre combustible y aire se ha utilizado la ecuación (Eq. B.2) que relaciona las densidades de los componentes de la mezcla y el dosado.

$$d_{mezcla} = \frac{dosado + 1}{\left(\frac{dosado}{d_{aire}}\right) + \left(\frac{1}{d_{combustible}}\right)} \quad (\text{Eq. B.2})$$

Siendo la  $d_{aire} = 1,1847 \text{ kg/m}^3$  en condiciones ambientales.

Se calcula la densidad de la mezcla en todos los estados físicos de los combustibles: gas, comprimido y licuado. Los resultados obtenidos se tabulan a continuación en la Tabla B.2.



kg/m <sup>3</sup>	densidad mezcla (comb. estado líquido)	densidad mezcla (comb. estado gas)	densidad mezcla (comb. estado comprimido)
gasolina	1,268		
gasoil	1,266		
biogás		1,191	
biodiesel	1,279		
etanol	1,316		
metanol	1,367		
propano	1,260	1,215	
butano	1,261	1,226	
40but+60prop	1,260	1,220	
gas natural	1,257	1,137	1,257
hidrógeno	1,218	0,880	1,216

---

TABLA B.2. Densidades de las mezclas de los combustibles teniendo en cuenta su estado de agregación



## C Unidades de conversión

La Figura B.1 muestra los factores de conversión considerados a la hora de realizar los cálculos de cambios de unidades.


<div>  <b>ANEXO 1.- Unidades de Conversión</b> </div> <div> <b>Dirección de Gas</b>  <b>Sd. Mercado de Gas</b> </div>						
<b>UNIDADES DE ENERGÍA</b>						
Equivalente a	GJ	KWh	MTBU	Te	therm	kcal
1 Gigajulio (GJ)	1	277,8	0,948	238,9	9,479	239.000
1 Kilowatio-hora	0,0036	1	0,003411	0,8601	0,03411	860,11
1 Millón de BTU (MTBU)	1,055	293,2	1	252	10	252.000
1 termia (te)	0,004186	1,162	0,00397	1	0,0397	1.000
1 therm	0,1055	29,32	0,1	25,2	1	25.200
1 kilocaloria (kcal)	0,00004186	0,001162	0,000003968	0,001	0,00003968	1
<b>UNIDADES DE VOLUMEN</b>						
Equivalente a	1 metro cúbico de gas	1 pie cúbico de gas	1 metro cúbico de GNL	1 Tonelada GNL	1 barril petróleo Arabian	1 tonelada petróleo Arabian
1 metro cúbico de gas	1	35,5	0,00171	0,00725	0,0066	0,0009
1 pie cúbico de gas	0,0283	1	0,00005	0,00002	0,00019	0,00003
1 metro cúbico de GNL	584	20,631	1	0,405	3,86	0,526
1 Tonelada GNL	1,379	48,69	2,47	1	9,53	1,3
1 barril petróleo Arabian	152	5,35	0,259	0,105	1	0,136
1 tonelada petróleo Arabian	1,111	39,218	1,9	0,769	7,33	1
<div> <math>1bcm=10^9 m^3</math>  <b>Metros cúbicos</b>                      Normal (<math>Nm^3</math>): Medido a 0° y 1 atm=1,055 <math>Sm^3</math>                      Estándar(<math>Sm^3</math>): Medido a 15° y 1 atm= 0,948 <math>Nm^3</math> </div> <div> <b>Poder calorífico del gas natural:</b> (Valores habituales)                      PCI (**) /PCS(***)= 0,9                      PCS = 10.000 kcal/ <math>Nm^3</math>                      PCI = 9.000 kcal/ <math>Nm^3</math> </div>						

Fig. C.1. Unidades de conversión consideradas. Fuente: Boletín Mensual de Estadísticas de gas natural (Diciembre 2003)



